



Patrícia Alexandra Pereira Abrantes

Licenciada em Engenharia Química e Bioquímica

Estudo de Causas Raiz na Falha de Aderência em Revestimentos Aplicados em Ligas de Alumínio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Química e Bioquímica

Orientador: Tiago Filipe Barros Gomes, Engenheiro de
Processo, *Caetano Coatings*

Co-orientador: Professor Doutor Mário Eusébio, Faculdade
de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Susana Filipe Barreiros

Arguente(s): Engenheiro Fernando Miguel Vidal Anacleto

Estudo de Causas Raiz na Falha de Aderência em Revestimentos Aplicados em Ligas de Alumínio

Copyright © Patrícia Alexandra Pereira Abrantes, 2017

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Chegou o momento final! O momento de distribuir o “obrigada” a tantas pessoas que me acompanharam durante a minha vida académica e durante estes últimos e intensos 6 meses.

Não foi fácil atingir esta meta mas obrigada a quem participou na corrida!

Antes de mais quero agradecer à Caetano Coatings, em especial ao Engenheiro Fernando Anacleto por me ter dado a possibilidade de realizar a minha dissertação de mestrado. Quero agradecer ao meu chefe todas as oportunidades que já me foram dadas ao longo destes 6 meses, obrigada por tudo, principalmente por acreditar em mim!

Quero também prestar o meu agradecimento ao Professor Mário Eusébio pelo seu apoio, é sem dúvida do melhor que a FCT tem. Apesar de todas as nossas “zangas” de projeto está perdoado. Obrigada Professor por tudo o que me transmitiu, ensinou e alertou, é de admirar toda a sua dedicação.

Ao meu orientador Tiago Gomes só tenho a agradecer o tempo despendido desde sempre, em prole da minha formação. Expresso o meu sincero obrigada, por todos os conhecimentos passados, todo o apoio e principalmente por toda a paciência que teve em aturar-me diariamente.

Sinto-me eternamente grata à equipa da Caetano Coatings que me acompanhou diariamente... vocês são incansáveis!!!

Obrigada Telma, por te teres tornado uma grande amiga nestes últimos tempos. Fostes, és e não tenho dúvidas que serás sempre um grande suporte na minha vida.

Obrigada Dina, pela sua alegria e boa disposição! Devo-lhe muito, ensinou-me muito, e não estamos a falar só de ensaios de laboratório sabe disso.. há coisas na vida muito importantes.

Parceiro, não me podia esquecer de ti.. Obrigada Paulino, és um amigo 5 estrelas, não te conheci nos tempos de faculdade mas só tenho a agradecer de nos termos cruzado agora. És sem dúvida um suporte para mim, um amigo como há poucos!!

Obrigada Sónia, por me ensinares a cortar no temperamento. Foste muitas vezes a minha conselheira ao longo deste percurso, obrigada por me ajudares a traçar um caminho melhor.

Valéria e Leonardo, apesar da nossa convivência não ser tão grande sei que posso sempre contar com todo o teu apoio. Porque quando não se sabe pergunta-se à Valéria! Obrigada pelo acolhimento e receção.

Margarida e Gonçalo, a vocês só tenho a dizer uma pequena coisa.. MiEQB forever!!!

Agradeço agora à minha mãe e ao meu pai por todo o apoio e confiança que desde sempre depositaram em mim, obrigada por me darem a possibilidade de chegar até aqui. Obrigada pelo ombro que sempre me deram para chorar e o incentivo para fazer sempre mais e melhor, espero não vos desiludir.. amo-vos muito.

E porque desde sempre e para sempre os amigos são a família que nós escolhemos não posso deixar de agradecer à, Inês Hilário e Joana Frutuoso esta tese é também um pouco vossa. É graças ao vosso apoio e carinho que hoje estamos todas juntas praticamente a encerrar mais um capítulo das nossas vidas. Adoro-vos milhões!

Prima linda, quero também agradecer-te pela tua presença na minha vida. És fantástica Rafinha!

Finalizo a agradecer ao meu namorado, ao meu Tiago, que nunca me deixou ir abaixo nem desistir mesmo nos momentos mais difíceis. Obrigada por seres o meu suporte e não me deixares cair. Foram tempos muito intensos mas conseguimos chegar lá, e sei que um bocadinho de ti também está aqui! Sem ti, não tinha sido possível!

E aqui se vê a rapariga de sorte que sou!!!

Um beijo enorme para todos vocês,

Resumo

A presente dissertação evidencia o caso de estudo das causas raiz nas falhas de aderência em substratos metálicos, recorrendo a mecanismos de resolução estruturada de problemas com o auxílio da metodologia Shainin, metodologia esta bastante utilizada por empresas de topo em vários ramos^[1,2]

Com o auxílio de ferramentas de gestão da qualidade foi possível classificar a severidade da causa, confirmar o seu efeito e proceder a ações corretivas de modo a atenuar o efeito ou até eliminá-lo do processo. Todas estas etapas de investigação, compreensão e resolução foram acompanhadas por uma equipa pluridisciplinar através de sessões de brainstorming, onde se reuniram todos os intervenientes no processo de modo a que fosse possível o foco na determinação da causa raiz.

Após a estruturação do procedimento de testes a serem realizados para a identificação do problema estes foram colocados em prática para posteriormente serem caracterizados de acordo com a norma regente. O objetivo desta análise centra-se na compreensão do mecanismo que promove a falta de aderência. Para além disso, foram também testadas diversas causas raiz para se verificar qual ou quais as mais evidentes.

Deste modo, verificou-se a importância do pré-tratamento das peças na aderência e resistência à corrosão. Um pré-tratamento ineficaz poderá conduzir aos problemas anteriormente mencionados, destruindo o revestimento e eliminando as funções decorativas da peça.

Contudo o pré-tratamento não é insuficiente por si só, a presença de óleos é o que o inibe de desempenhar uma boa função. Através da análise do FTIR é notória a influência do óleo na aderência do revestimento ao substrato.

Foram ainda realizados ensaios de caracterização de acordo com a norma regente GMW 14669, de modo a analisar a qualidade do revestimento, e ensaios de tensão superficial, ângulos de contacto e FTIR analisando nesta perspetiva características químicas qualitativas.

A liga de alumínio em estudo EN 6060 foi também caracterizada de forma quantitativa.

Abstract

The present dissertation evidences the study of root causes in adhesion failures in metallic substrates, through the use to structured problems solving mechanisms with the assistance of the Shainin methodology, this is widely used by top companies.

With the support of quality management tools it was possible to classify a severity of the cause, confirm its effect and take corrective actions in order to reduce the effect or eliminate the process. All of these research, understanding, and resolution steps were followed up by a multidisciplinary team through brainstorming sessions where all stakeholders in the process were brought together so that focus on root cause determination was possible.

After a structuring of the test procedure were performed to identify the problem, these were put into practice for the case are characterized according the standart. The purpose of this analysis is to understand the mechanism that promotes poor adhesion. In addition, a number of root causes were also tested to see what or which ones were most evident.

In this way, the importance of the pre-treatment of the parts in the adhesion and corrosion resistance was verified. An ineffective pre-treatment can lead to problems, please destroying the coating and eliminating as decorative functions of the part.

However pre-treatment is not insufficient in itself, the presence of oils is what inhibits it from performing a good function. Through the FTIR analysis, the influence of the oil on the adhesion of the coating to the substrate is evident.

Characterization tests were also carried out in according with GMW 14669, in order to analyze a coating quality, surface tension, contact angles and FTIR, analyzing qualitative chemical characteristics in this perspective.

The aluminum alloy in study EN 6060 was also characterized quantitatively.

Key words: Adhesion, Aluminium, Oil, FTIR, Shainin, Pareto

Índice

Capítulo 1 - Enquadramento e Motivação	1
Capítulo 2 - Introdução.....	3
2.1 Metodologia Shainin	4
2.2 Alumínio – Aluminium alloy EN-AW 6060	9
2.3 Pré-tratamento.....	9
2.3.1 Desengorduramento	10
2.3.2 Lavagem de água desmineralizada	11
2.3.3 Desoxidação	11
2.3.4 Silanos	11
2.4 Revestimento por pintura	13
2.4.1 Tinta e os seus constituintes	13
2.4.2 Primário.....	15
2.4.3 Base	15
2.4.4 Verniz	15
2.4.5 Técnica de aplicação – Electroestática	17
2.5 Caracterização do revestimento	19
2.5.1 Tensão superficial.....	19
2.5.2 Ângulo de contacto	19
2.5.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier.....	20
2.5.4 Microscopia ótica	20
2.5.5 Caracterização segundo a norma regente	20
Capítulo 3 - Metodologia, Materiais e Métodos	25
3.1 Ferramentas de Qualidade.....	25
3.2 Caracterização do revestimento	25
3.2.1 Tensão superficial.....	26
3.2.2 Ângulos de contacto.....	27
3.2.3 FTIR.....	28
3.2.4 Perda de massa	28
3.2.5 Ensaio da norma regente.....	29
Capítulo 4 - Discussão de Resultados	35
4.1 Ensaio segundo a norma regente	41
Espessura.....	41
Aderência	41
Ensaio de adequação da cura.....	42
Ensaio de humidade e condensação constante	43

Ensaio de Nevoeiro Salino.....	44
Corrosão filiforme	45
Ensaio de resistência ao risco	46
Ensaio de resistência aos químicos	47
4.2 Ensaios complementares	48
4.3 Perda de Massa e curva de temperatura	49
Capítulo 5 - Conclusões	53
5.1 Desenvolvimento de trabalho futuro	54
Referências Bibliográficas.....	55
Anexos	58
Anexo A - Tabela comparativa de parâmetros e etapas de tratamento da Linha 1 e 8....	58

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Fatores que determinam a qualidade do revestimento	1
Figura 2.1 - Etapas do processo de pintura.....	3
Figura 2.2 - Diagrama de Pareto (Paradigma RedX)	5
Figura 2.3 - Diagrama de Ishikawa ilustrativo.....	7
Figura 2.4 – Esquema de banhos para o processo químico na linha de pintura líquida da Caetano Coatings	10
Figura 2.5 - Mecanismo de remoção de óleo através da formulação de micelas	11
Figura 2.6- Diferença de espessura no tratamento de conversão.....	12
Figura 2.7 - Camada amorfa (Silanos)	12
Figura 2.8- Constituintes das tintas	13
Figura 2.9 - Esquema de pintura e especificações utilizadas.....	13
Figura 2.10 - Distribuição molecular antes e depois da reticulação	16
Figura 2.11 - Esquema de ligação e reticulação através da cura química	17
Figura 2.12 - Mecanismo de aplicação electroestática.....	18
Figura 2.13- Mecanismo de medição da tensão superficial	19
Figura 2.14 - Ângulo de contacto e tensão superficial segundo Young.....	20
Figura 3.1 – Tensiómetro	27
Figura 3.2 - Goniómetro e respetivo software.....	28
Figura 3.3 - Elcometer 355 e sonda não ferrosa	29
Figura 3.4 - Elcometer 107 e fita adesiva Scotch 898 3M.....	30
Figura 3.5 - Etanol a 96% e gaze	30
Figura 3.6 - Câmara de condensação constante e humidade.....	31
Figura 3.7 - Cortante utilizado na realização do corte	31
Figura 3.8 - Câmara de Nevoeiro Salino.....	32
Figura 3.9- Câmara de Nevoeiro Salino Cupro Acético	33
Figura 3.10 - Equipamento de resistência ao risco	33
Figura 4.1 - Diagrama de Pareto adequado ao caso de estudo	35
Figura 4.2 - Película destacada e enviada para análise.....	36
Figura 4.3 - Diagrama de Ishikawa	37
Figura 4.4 - Fluxograma do processo do projeto em estudo	38
Figura 4.5 - Sobreposição dos espectros de IR obtidos nas amostras: "amostra de tinta" (espectro vermelho) e "amostra de óleo" (espectro azul).....	39
Figura 4.6 - Curva de Temperatura	50

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Comparação entre métodos convencionais e a metodologia Shainin.	5
Tabela 2.2 - Metodologia Shainin: FACTUAL.....	6
Tabela 2.3 - Metodologia do trabalho em equipa (Diagrama de Ishikawa)	7
Tabela 2.4 - Tabela ilustrativa 5W2H	8
Tabela 2.5 - Símbolos utilizados na elaboração de fluxogramas	8
Tabela 2.6- Composição química de acordo com EN573-3 (EN-AW%).....	9
Tabela 2.7 - Eficiência da transferência de tinta de acordo com as diferentes tecnologias.....	18
Tabela 2.8 - Guia de corte para a aderência	21
Tabela 2.9 - Classificação da aderência de acordo com o destacamento.....	22
Tabela 2.10 - Classificação de acordo com as alterações do verniz.....	22
Tabela 2.11 - Classificação da alteração visual após o ensaio dos químicos	23
Tabela 3.1 – Testes realizados	26
Tabela 3.2 - Reagentes utilizados na medição da tensão superficial.....	27
Tabela 4.1 - Tabela síntese de diagnóstico do problema.....	35
Tabela 4.2 - Valores de frequência dos espectros obtidos nas amostras. Bandas coincidentes entre os dois espectros.	39
Tabela 4.3 - Resultados das espessuras médias do revestimento	41
Tabela 4.4 - Resultados da aderência pelo método da quadrícula.....	42
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de adequação da cura	42
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de aderência após 120h de humidade.....	43
Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de humidade após 240h	44
Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de nevoeiro salino	45
Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de corrosão filiforme.....	46
Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de resistência ao risco	46
Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de resistência aos químicos	47
Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de aderência dos restantes ensaios	48
Tabela 4.13 - Resultados obtidos nas medições de tensões superficiais e ângulos de contacto	49
Tabela 4.14 - Resultados obtidos na perda de massa	51

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

GMW – *General Motors Worldwide*

FTIR - Espetroscopia de Infravermelhos por Transformada de Fourier

MO – Microscopia ótica

ANOVA – Análise de variância

BvC – *Boundary Value Check* (Verificação do valor limite)

IMCM – Instruções de montagem, controlo e manutenção de banhos

Capítulo 1 - Enquadramento e Motivação

A divisão Automotive da Caetano Coatings, dedica-se à pintura e ao tratamento de superfícies para peças destinadas à Indústria Automóvel. Nas suas várias linhas de produção são utilizadas diferentes tecnologias como a pintura a pó, a pintura líquida, a cataforese e a anodização.

A pintura líquida é uma solução eficiente e pode ser aplicada em diversos materiais. Esta promove uma proteção contra a corrosão, devido aos vários estágios presentes no pré-tratamento (desengorduramento, desoxidações, lavagens de água desmineralizada e silanos), permitindo uma melhor qualidade, durabilidade e acabamento ao produto^[3]. O desenvolvimento da indústria está inteiramente relacionado com a sua produtividade e competitividade, uma vez que esta retrata a sua eficiência na produção de um produto permitindo o aumento das margens de lucro e melhoria da imagem da empresa. A procura por melhores métodos de trabalho e consequente otimização de processos de fabrico tem como foco a obtenção de uma melhor e maior produção com o menor custo associado. Deste modo, é essencial o controlo, monitorização e otimização do processo - Figura 1.1.

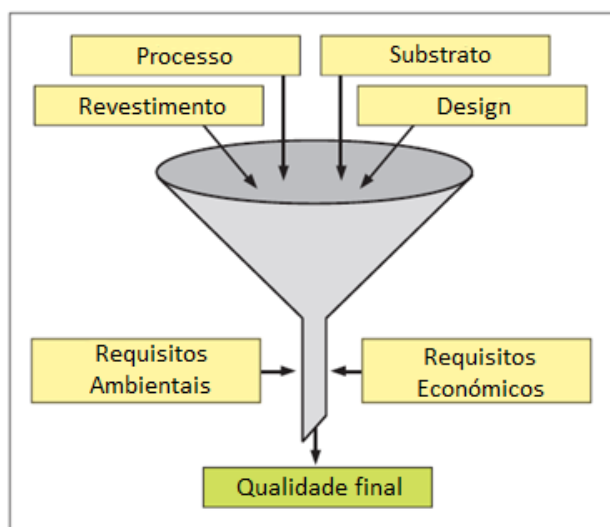


Figura 1.1 - Fatores que determinam a qualidade do revestimento^[3]

Na pintura líquida um dos grandes desafios é a escolha de um esquema de pintura adequado e compatível ao substrato, bem como o modo de aplicação de forma a minimizar falhas e defeitos no produto final.

Uma falha comum é a falta de aderência ao substrato, ou até mesmo a falha entre as camadas de pintura (verniz/base ou base/primário), pelo que o desenvolvimento deste trabalho terá como objetivo perceber o porquê, como e onde é que este fenómeno aparece.

Assim sendo, este trabalho irá incidir no estudo e caracterização de revestimentos aplicados num substrato metálico (Aluminium alloy EN-AW 6060), utilizando técnicas como a, Espectroscopia de Infravermelhos por Transformada de Fourier (FTIR), Microscopia Ótica (MO), Medição de ângulos de contacto e tensão superficial.

Estudo de Causas Raiz na Falha de Aderência em Revestimentos Aplicados em Ligas de Alumínio

As peças pintadas irão ser sujeitas a vários testes laboratoriais, como aderência, nevoeiro salino e humidade, de acordo com os requisitos e normas do cliente com o intuito de avaliar a origem dos problemas de aderência e propor soluções de melhoria.

Capítulo 2 - Introdução

O desenvolvimento na área da ciência dos materiais tem permitido uma inovação tecnológica no ramo automóvel. A sua crescente procura e vulgarização, conduziram a preocupações de âmbito económico, técnico e ambiental que apenas foram possíveis de colmatar com a progressiva transformação dos componentes utilizados na indústria automóvel, bem como dos materiais que os constituem^[4].

Os materiais metálicos, como é o caso do alumínio, são os grandes constituintes do automóvel, devido às suas propriedades mecânicas e capacidade de maquinaria a baixo custo, estes podem ser revestidos por pintura, o que melhora a sua resistência à corrosão^[5]. A pintura consiste no resultado da aplicação de um determinado esquema que abrange, segundo a norma ISO 4618, uma “combinação de camadas de material de pintura que são aplicadas num substrato”. A aplicação de um esquema de pintura num determinado substrato, permite obter após cura um revestimento multifuncional, ou seja, um revestimento que simultaneamente protege o substrato e melhora o seu aspeto visual. Assim sendo, a pintura de peças metálicas é realizada em vários passos de modo a melhorar a adesão, proteção contra a corrosão e qualidade do produto final. ^[6]

Antes da aplicação do revestimento efetua-se a preparação da superfície através do pré-tratamento químico. Este assegura a qualidade do revestimento, através da eliminação de qualquer tipo de contaminação, e promove uma boa aderência ao substrato (Figura 2.1). A pintura inclui a aplicação de um primário, base e verniz, que posteriormente é sujeita ao processo de “secagem”, onde é retirado o material volátil da tinta.

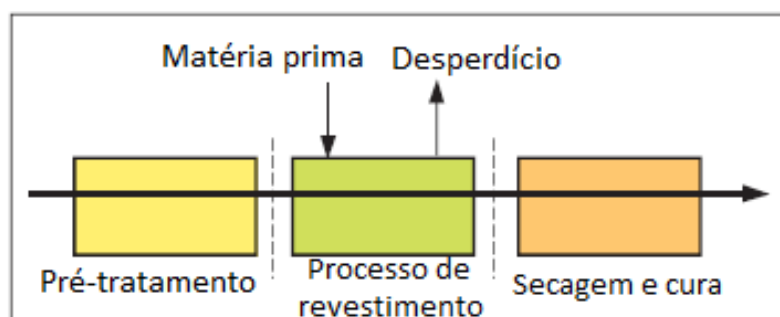


Figura 2.1 - Etapas do processo de pintura^[3]

Apesar das excelentes propriedades que um revestimento possa apresentar, caso não tenha uma boa aderência, não cumpre com os objetivos da sua aplicação. Deste modo, a aderência pode ser definida como o efeito das forças de atração na interface de duas fases sólidas diferentes que se aproximam. O pré-tratamento químico para além de eliminar as contaminações existentes no substrato, também é responsável pela criação de rugosidades e cavidades (“picagem” resultante da desoxidação) que promovem o mecanismo de adesão, uma vez que a ancoragem ao substrato se encontra mais facilitada.

No entanto, podem ocorrer falhas durante toda ou qualquer parte do processo e causar falta de aderência devido à fraca ligação do revestimento.

Estas falhas podem estar associadas apenas a uma causa ou a uma combinação das seguintes:

- Preparação superficial inadequada;
- Preparação errada da mistura dos componentes de pintura (primário, base e/ou verniz);
- Condições atmosféricas de aplicação (temperatura e humidade).^[5,6]

Para se conseguir compreender e prevenir a causa (ou causas) da falha e analisar as condições que a promoveram é necessário coletar diversas informações importantes que nos possam conduzir até à causa raiz da falha do revestimento de pintura. Assim sendo, a utilização de ferramentas de gestão da qualidade como é o caso da *5W2H*, do diagrama de *Ishikawa* e de *Pareto* permitem a esquematização de repostas durante o curso da investigação, e chegar mais rápida e eficazmente ao foco do problema. A aplicação destas ferramentas possibilita a recolha de informações relacionadas com antecedentes de falha, problemas de aplicação, onde é que ocorreram e porque é que ocorreram.^[9]

2.1 Metodologia *Shainin*

O crescente desenvolvimento e competitividade da indústria automóvel tem impulsionado as grandes organizações a terem como foco a satisfação do cliente e ao mesmo tempo manterem a vantagem sobre a concorrência. Deste modo, o grande objetivo centra-se em satisfazer todas as necessidades impostas pelo cliente, a nível de acabamento final mas também obter uma boa relação de custos (qualidade/preço).

Na expectativa de alcançar um elevado grau de satisfação por parte do cliente é necessário planear, controlar e melhorar o sistema de qualidade de uma empresa. A melhoria contínua, encontra-se em muitos casos, associada à redução das variações do processo. Estas são consideradas como um fator crítico, uma vez que influenciam a estabilidade do processo, o que consequentemente irá gerar mais desperdício e prejuízo.

Reduzindo a variabilidade do processo pode-se garantir que este está sob controlo estatístico e o que é produzido encontra-se dentro do padrão desejado pelo cliente. Deste modo, diminui-se a percentagem de produto rejeitado e aumenta-se a margem de negócio.

As variações do processo podem ser colmatadas através da identificação e controlo da causa raiz, seguindo uma resolução estruturada de problemas, e/ou diminuição da sensibilidade do processo para a origem da variação.

A metodologia *Shainin* desenvolvida por Dorian Shainin entre as décadas de 50 e 90 é usada por empresas líderes no setor automóvel como uma ferramenta efetiva para a resolução de problemas^[8,9]. Esta metodologia encontra-se dividida em duas fases:

- Diagnóstico: parte inicial da resolução de problemas (desde a incidência da falha até à descoberta da causa raiz);
- Correção: consiste na implementação de uma solução eficaz.

Shainin diferencia-se da metodologia tradicional de resolução de problemas devido à sua abordagem convergente para a identificação da causa raiz, designado de Efeito a Causa (Y a X) – Tabela 2.1. Para se ter sucesso ao aplicar este tipo de abordagem é estritamente necessário entender o efeito (*output Y ou GreenY*), e para se ter um bom conhecimento do efeito é necessário conhecer bem *a priori* o produto e o seu processo. É através de uma estratégia progressiva e convergente que é possível identificar as causas raiz (Xs), eliminando as causas potenciais (*RedX*)^[11].

Tabela 2.1 – Comparação entre métodos convencionais e a metodologia Shainin (Adaptado de [1]).

Resolução de Problemas - Método Convencional	Resolução de Problemas – Metodologia Shainin
<i>Brainstorming</i> de causas possíveis (Xs)	Estudo do efeito (Y) em detalhe
Raciocínio - De causa a efeito	Raciocínio - De efeito a causa
(Inicialmente) Estratégia divergente	Estratégia convergente desde o início
Focado na análise de dados	Focada na estratégia da investigação
Ferramentas estatísticas avançadas	Ferramentas de análise simples
Necessidade de variação de parâmetros de processo suspeitos (Xs) no estudo da relação causa/efeito utilizado desenho de experiências	Sem interferência nos processos de produção no estudo da relação causa/efeito
Ferramentas típicas para encontrar a causa raiz: <i>brainstorm</i> , diagrama de <i>Ishikawa</i> , desenho de experiências, ANOVA, análise de regressão/correlação, t-teste.	Ferramentas típicas para encontrar a causa raiz: árvore da decisão, <i>Multi Vari</i> , procura de componentes, comparação por pares, lista de pistas, teste <i>BvC</i> e diagrama de <i>Pareto</i> .
Apelativo para a Qualidade	Apelativo para a Engenharia

O paradigma *RedX* é a chave de toda a metodologia, uma vez que se baseia na forte convicção que existe sempre uma causa dominante à variação. Esta afirmação realizada por *Shainin* vem de encontro à aplicação do diagrama de *Pareto* às causas da variação (Figura 2.2). Por norma, a variação da produção é causada pela variação de várias entradas (causas).

Através dos diagramas de *Pareto* podemos definir o contributo das variáveis do processo (Xs): a causa dominante da variação é chamada *RedX*, as principais são chamadas *PinkX* e *Pale PinkX*. *RedX* pode ser uma única variável ou uma interação entre variáveis separadas^[10].

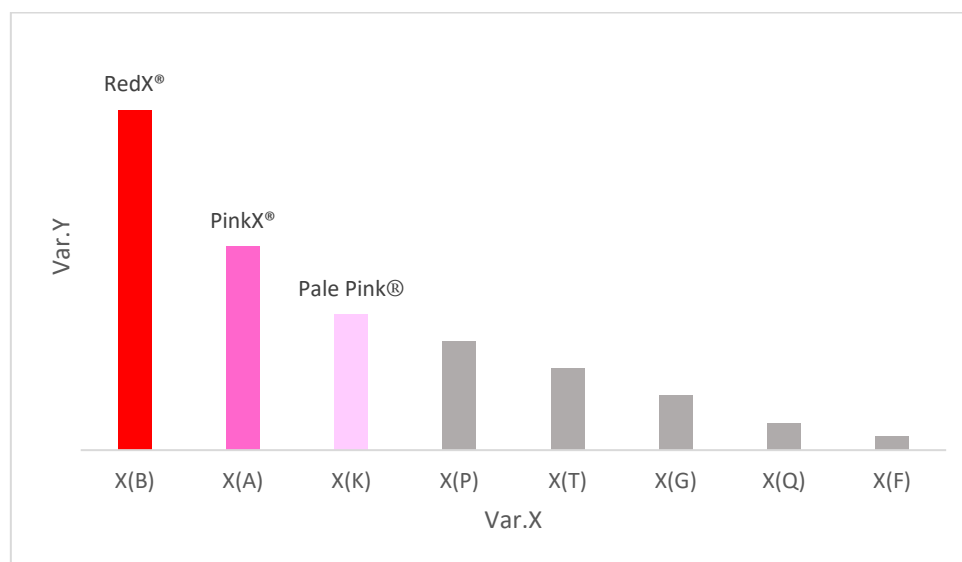


Figura 2.2 - Diagrama de Pareto (Paradigma RedX)

Os diagramas de *Pareto* foram desenvolvidos para determinar a importância relativa das informações para fixar as prioridades de estudo. Estes consistem numa ferramenta gráfica de visualização de dados hierarquizados por ordem decrescente.

Deste modo, o caminho a seguir, segundo *Shainin*, para a resolução de problemas é chamado *FACTUAL*™: *Focus, Approach, Converge, Test, Understand, Apply, Leverage* (Tabela 2.2, adaptado de Problem solving for Manufacturing).

Tabela 2.2 - Metodologia *Shainin*: *FACTUAL*

<i>Etapas</i>	Conceito
<i>Focus</i>	Definição do problema
<i>Approach</i>	Desenvolvimento da definição de estratégia
<i>Converge</i>	Comparar o melhor e o pior caso
<i>Test</i>	Avaliação do risco
<i>Understand</i>	Compreender as interações
<i>Apply</i>	Ação corretiva aplicada e verificada
<i>Leverage</i>	Cálculo de benefícios.

Segundo *Shainin* a metodologia de resolução de problemas tem em consideração que para cada efeito existe uma causa raiz dominante. A maneira mais rápida de a identificar é através de uma pesquisa usando dados empíricos e um processo de eliminação progressiva em que são utilizadas ferramentas de análise simples e focadas na lógica efeito/causa^[10].

Outro exemplo de uma metodologia utilizada na resolução de problemas na indústria automóvel é a metodologia Seis Sigma. Inicialmente esta foi desenvolvida apenas como um algoritmo para reduzir a variação nos processos de fabrico, ou seja, um método focado nas várias etapas do processo. Com o evoluir dos tempos este método começou a ser utilizado para uma resolução mais geral de problemas, tendo perdido assim algum foco o que poderá levar a limitações quanto à sua eficiente aplicabilidade. Isto é, ao perder o seu carácter de domínio de tarefa, perdeu também a sua capacidade de fornecer um suporte eficiente como solucionador de problemas, uma vez que na sua fase de diagnóstico não é possível a eliminação dos candidatos a causas raiz^[10].

A principal diferença entre a estratégia *Shainin RedX*® (*FACTUAL*™) e a metodologia Seis Sigma (*DMAIC* - *Define, Measure, Analyze, Improve and Control*) é a fase *Approach*. Esta é a fase onde a equipa de resolução de problemas desenvolve uma estratégia baseada na compreensão da falha, desempenho do sistema e distinção do produto bom (*BOB* – *Best of the best*) do mau (*WOW* – *Worst of the worst*).

Se analisássemos a resolução de problemas na visão de um gerente, identificaríamos duas deficiências principais do Seis Sigma: os projetos costumam consumir muito tempo e muitas vezes não trazem os resultados esperados.

A eficiência do processo de diagnóstico depende muito da estratégia de pesquisa realizada. Uma ferramenta normalmente utilizada como solucionador de problemas é o diagrama de *Ishikawa*, também designado como diagrama causa-efeito ou espinha de peixe devido à sua forma. Este diagrama permite estabelecer uma relação entre as causas e o efeito resultante, e ainda classificá-las em termos de impacto causado. Após a construção deste diagrama é possível testar as causas mais relevantes e verificar se o impacto é relevante ou não no processo (Tabela 2.3)^{[10],[12]}.

Tabela 2.3 - Metodologia do trabalho em equipa (Diagrama de Ishikawa)^[12]

<p>Esclarecimento do efeito</p> <ul style="list-style-type: none"> • O problema deve ser esclarecido e definido de forma clara e sucinta; • Caso seja demasiado complexo é aconselhável a sua divisão em diversos elementos; • Enunciar causas por associação de ideias (<i>brainstorming</i>); • Junção das causas através de ramificações.
<p>Determinação da importância das causas</p> <ul style="list-style-type: none"> • É realizada uma votação para a causa que parece à equipa a mais importante, e que será a eleita para se iniciar com o despiste; • As outras causas serão documentadas e a sua investigação adicional será realizada pela ordem de prioridades decidida pelo grupo.
<p>Verificação da causa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar se a causa seleccionada afeta a característica principal através de experiências, recolha de dados e gráficos de controlo.
<p>Proceder a ações corretivas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Após a verificação da causa podem surgir ações corretivas adequadas, no entanto o método pode não estar de acordo com certas condições de produção. Nesse caso é necessária uma nova reunião em equipa para se redefinir outra estratégia.

O diagrama de *Ishikawa* potencia também o trabalho pluridisciplinar, uma vez que se deve reunir todas as pessoas relacionadas e afetadas com o problema, quer sejam operadores ou administradores^[12]. Uma imagem ilustrativa do diagrama de *Ishikawa* é visível na Figura 2.3.

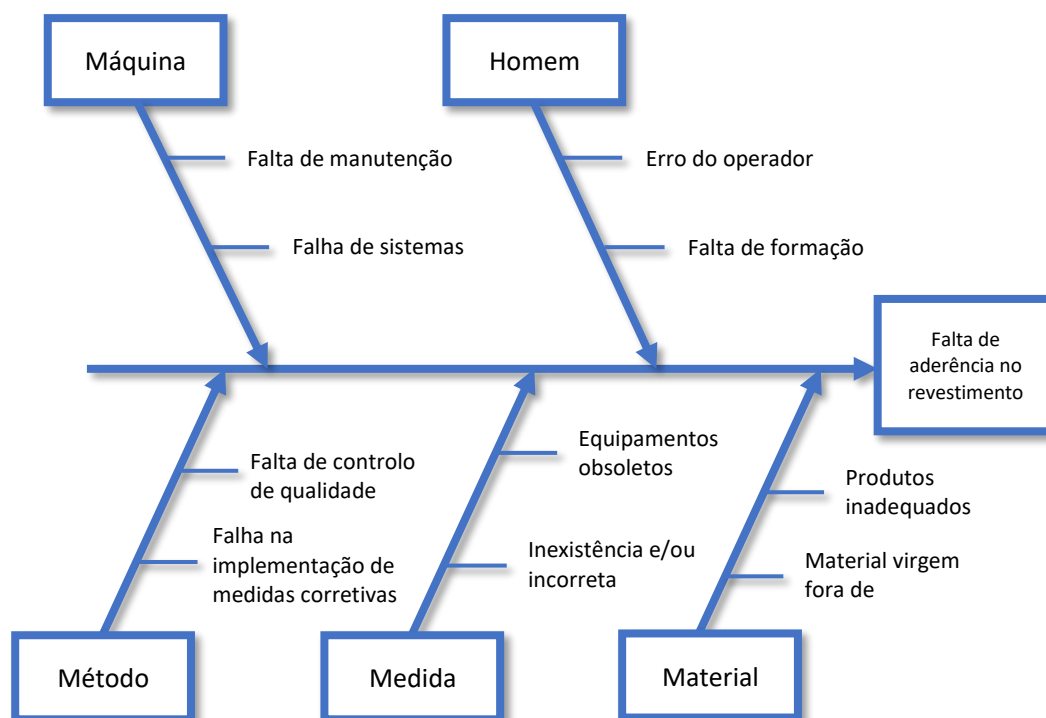


Figura 2.3 - Diagrama de Ishikawa ilustrativo

Outra ferramenta de apoio à gestão/resolução de problemas é a tabela 5W2H, é assim vulgarmente denominada uma vez que faz referência a expressões inglesas. Os 5W referem-se ao *What* (o quê)?, *When* (quando)?, *Who* (quem)?, *Where* (onde)?, e *Why* (porquê)?, enquanto que os 2H significam



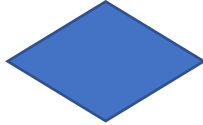

How (como)? e *How much* (quanto custa)?. Estas questões devem ser colocadas a toda a equipa pluridisciplinar para se proceder ao preenchimento da Tabela 2.4.^{[9],[13]}

Tabela 2.4 - Tabela ilustrativa 5W2H^[13]

Plano de ação ou projeto						
Ação: Reduzir os problemas de aderência						
O quê? (What)	Por quê? (Why)	Quem? (Who)	Onde? (Where)	Quando? (When)	Como? (How)	Quanto? (How much)
Falta de aderência do revestimento	Causas a definir	Patrícia Abrantes	Localização da ação a implementar	Data de implementação da ação	Ação	Custo associado à implementação da ação

Para uma representação gráfica da sequência das atividades de um processo recorre-se normalmente à elaboração de um fluxograma. Esta ferramenta da qualidade facilita a visualização das diversas etapas que compõem um determinado processo, permitindo identificar os passos que merecem maior atenção, foco de estudo e melhoria. O fluxograma mostra o que é realizado em cada etapa do processo, e o que está associado a cada uma delas (material, serviço e/ou tomada de decisão). Esta ferramenta é fundamental ao longo de todo o desenvolvimento do processo, pois numa fase inicial permite o seu planeamento e com o passar do tempo permite o seu aperfeiçoamento, ou seja, uma vez que já estão traçados os pontos mais importantes do processo, pode ser realizada uma análise crítica de forma a se obter uma melhoria contínua do projeto em desenvolvimento. Os fluxogramas são realizados através da junção de diversas figuras geométricas com um significado associado.^[14] É possível verificar a simbologia utilizada através da Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Símbolos utilizados na elaboração de fluxogramas^[14]

Símbolo	Definição
	Início/fim – Indica o início ou fim do processo
	Operação – indica quando ocorre alguma transformação, seja esta de natureza física ou química, podendo também estar associado a uma etapa de montagem, desmontagem e/ou preparação para a realização da etapa seguinte
	Tomada de decisão – indica o ponto em que a decisão deve ser tomada. A questão é escrita dentro do losango, admitindo apenas um fluxo de entrada mas dois fluxos de saída (correspondente ao sim e ou não) em função da resposta
	Transporte – indica a direção do fluxo

2.2 Alumínio – Aluminium alloy EN-AW 6060

O elemento alumínio, encontra-se na tabela periódica com o símbolo Al e tem um número atômico de 13. À temperatura ambiente é sólido e considerado o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre. Neste enquadramento, e devido também a ser considerado um material leve e resistente é bastante utilizado na estrutura do carro, podendo reduzir o peso do automóvel até 25% comparativamente aos metais anteriormente utilizados^[5].

O alumínio é muito utilizado na indústria automóvel devido às suas propriedades de ductilidade/maleabilidade, sendo assim possível o seu processamento por diversas vias: laminação, extrusão, forjamento, trefilação e estampagem. Além disso, apresenta também uma menor densidade comparativamente a outros materiais ($Al=2,7 \text{ g/cm}^3$ vs $Fe=7,8 \text{ g/cm}^3$) e uma boa condutibilidade térmica, sendo cerca de um terço inferior à condutibilidade do cobre e aproximadamente 4 vezes mais condutor do que o aço^[15].

Nesta indústria as propriedades de resistência à corrosão e ao impacto são deveras importantes, e nesse aspeto o alumínio também é um material de referência. Formando uma camada de Al_2O_3 , visando o mesmo princípio de proteção contra a corrosão que a camada de Cr_2O_3 confere ao aço inoxidável e oferecendo o dobro da resistência ao impacto^[15].

Este elemento classificado como um metal de pós-transição possibilita também uma eficiência e sustentabilidade ambiental pois, prevê-se que a percentagem de volume de alumínio utilizado em automóveis deverá aumentar de 6,6% (valor de 2015) para 26,6% em 2025, sendo que em média 90% do alumínio presente no carro pode ser reciclado quando este se encontra em fim de vida ^{[15],[16]}.

A utilização de um metal com uma baixa densidade permite também a diminuição do peso do veículo, o que se reflete na diminuição do consumo de combustíveis e emissão de gases de CO_2 . A autonomia dos veículos híbridos e convencionais é também melhorada^{[17],[18]}.

A liga de alumínio utilizada no material estudado ao longo desta dissertação é uma liga extrudida de alumínio alloy 6060, tratável termicamente, possui uma boa resistência à corrosão, boa soldabilidade e boa formabilidade a frio. É comumente usada para seções transversais complexas e tem uma boa resposta de anodização^[19]. A sua composição encontra-se descrita na Tabela 2.6.

Tabela 2.6- Composição química de acordo com EN573-3 (EN-AW%)^[19]

Composição química (%)											
Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros		Al
									Cada	Total	
6060	0,30-0,60	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,60	0,05	0,15	0,10	0,05	0,15	Restante

2.3 Pré-tratamento

O pré-tratamento químico tem como finalidade a remoção de contaminantes da superfície do metal, como é o caso de óleos e gorduras e melhorar a aderência da tinta ao substrato, bem como a suas propriedades de resistência à corrosão, através da aplicação de um revestimento de conversão. ^[20]

A *Caetano Coatings* possui nas suas linhas de pintura líquida e a pó um tratamento de conversão à base de silanos. A sua aplicação é realizada num túnel através de pulverização. Anteriormente à aplicação da camada dos silanos existem as seguintes etapas: pré-

desengorduramento, desengorduramento, desoxidação I, desoxidação II, e lavagem com água desmineralizada.

A Figura 2.4 permite verificar a sequência do túnel do pré-tratamento no caso do substrato alumínio, bem como os parâmetros de funcionamento.



Figura 2.4 – Esquema de banhos para o processo químico na linha de pintura líquida da Caetano Coatings

Uma limpeza adequada à superfície do alumínio é uma das etapas mais importantes do seu processo de pintura, uma vez que vai ajudar a promover um bom mecanismo de aderência.

2.3.1 Desengorduramento

Existem dois tipos de desengorduramento, o ácido e o alcalino. Na linha de pintura líquida é utilizado um desengorduramento ácido, que além de permitir uma eliminação eficiente dos contaminantes ainda tem um papel de desoxidação da superfície. Os desengorduramentos ácidos são por norma constituídos por misturas de ácidos minerais (ácido sulfúrico e fosfórico), agentes complexantes e tensoativos^[21]. Os tensoativos são utilizados em muitos processos tais como o desengorduramento, como auxiliares de processos de decapagem na remoção de óleo por formação de micelas, como descrito na Figura 2.5^[22].

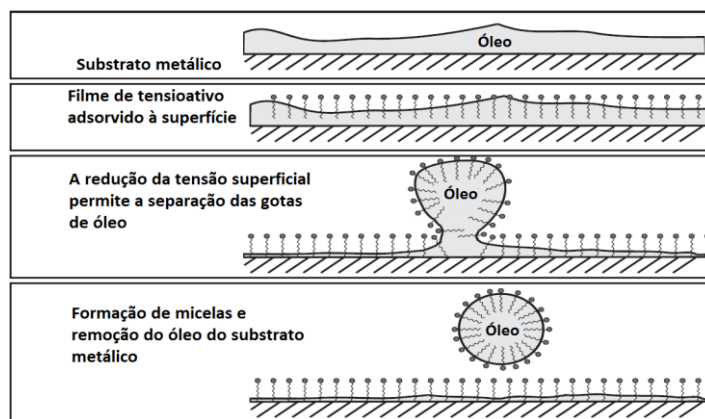


Figura 2.5 - Mecanismo de remoção de óleo através da formação de micelas (Adaptado de [23])

2.3.2 Lavagem de água desmineralizada

A lavagem por aspersão consiste em projetar uma fina névoa de água de lavagem diretamente sobre as peças que saem do banho de desgorduramento, assim o objetivo desta etapa é garantir a remoção de todos os produtos químicos e contaminantes que possam permanecer sobre a superfície metálica, e evitar que estes passem para as etapas seguintes do processo. Pretende-se igualmente assegurar uma eficiente limpeza para evitar a formação de empolamentos e falhas de aderência entre o revestimento e a superfície^{[20],[21]}.

Este sistema tem como vantagem a redução do consumo de água de lavagem e apresentam ainda uma melhor qualidade de lavagem devido ao efeito hidromecânico das gotas de água quando o impacto com a superfície a lavar^[21].

2.3.3 Desoxidação

Seguidamente, é realizada a desoxidação (2 estágios) que tem como finalidade promover a remoção de óxidos das superfícies metálicas e consequentemente ativá-la, criando porosidades na superfície para que esta se torne uniformemente rugosa e facilite a aderência do revestimento. Nestes estágios utilizam-se normalmente soluções de ácido clorídrico, sulfúrico ou fosfórico^[20].

Como já referenciado anterior, verifica-se que os estágios de desgorduramento e desoxidação são então responsáveis pela criação das porosidades no substrato metálico. Ao longo das etapas do pré-tratamento este, tem tendência a perder parte da sua massa devido ao ataque químico a que se encontra exposto. Pelo que se considera necessário analisar e registar as perdas de massa que o pré-tratamento proporciona, verificando deste modo a sua eficiência.

2.3.4 Silanos

De modo a finalizar o pré-tratamento ao alumínio é aplicado um revestimento de conversão, este resulta na aplicação de um tratamento químico com compostos inorgânicos sobre a superfície metálica já limpa. Este tratamento tem como objetivo a uniformização da superfície, que consequentemente irá aumentar a ligação ao revestimento e minimizar a propagação da corrosão.

Inicialmente, o tratamento de conversão utilizado na indústria automóvel era à base de compostos de crómio VI, uma vez que eram considerados os inibidores de corrosão mais eficientes. No entanto, devido à sua toxicidade e propriedades cancerígenas, a sua utilização foi proibida pelo Decreto-Lei nº196/2003 de 23 de Agosto de 2003 (Diário da República – I Série – A)^[20].

Associada a esta proibição existiu a necessidade de alternativas ao tratamento de conversão, o que despoletou o desenvolvimento dos trialcóxidos de silício, vulgarmente denominados de silanos.

O processo Oxsilan® é baseado em silanos que formam soluções aquosas, por hidrólise e condensação, polissiloxanos. Durante o processo de revestimento, os grupos de silanol reactivos podem ser ligados quimicamente ao metal, bem como ao revestimento de tinta. A camada de silanos criada atinge espessuras na faixa de 100 nm, sendo isso suficiente para obter o mesmo grau de proteção contra a corrosão. Comparativamente com as camadas de fosfato de zinco que são dez vezes mais espessas (Figura 2.6), sendo possível reduzir o consumo de materiais e os tempos de pré-tratamento, e aumentar a produtividade^[24]. Outra peculiaridade da película de silanos é a sua estrutura amorfa (Figura 2.7) e as suas propriedades mecânicas, como a resistência ao risco, impacto e desgaste^[20].

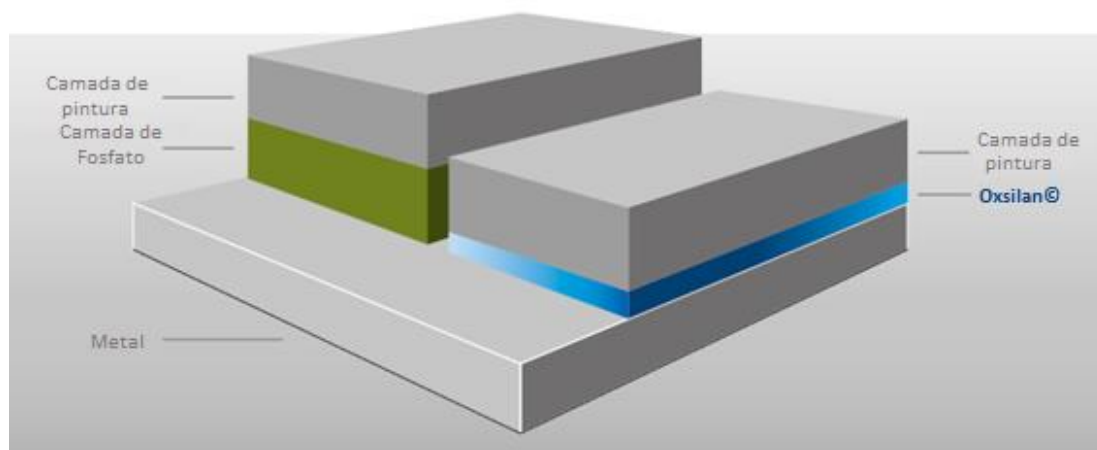


Figura 2.6- Diferença de espessura no tratamento de conversão^[25]

É ainda possível destacar os menores custos associados ao processo, uma maior produtividade, capacidade de se adaptar a qualquer substrato metálico (multi-metal) e compatibilidade com o ambiente (eco-friendly – menor risco de segurança, saúde e meio ambiente)^[24].

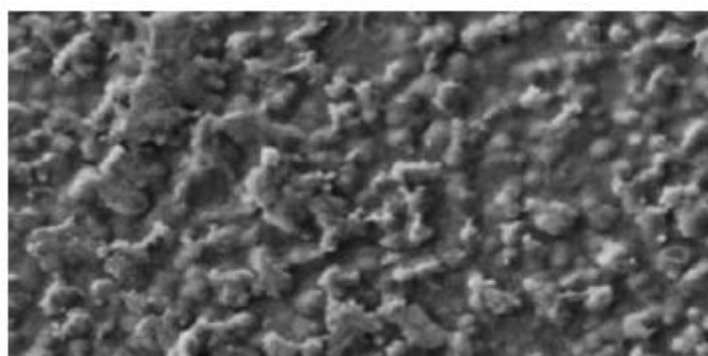


Figura 2.7 - Camada amorfa (Silanos)^[25]

A aplicação dos silanos é realizada por pulverização com uma duração que varia entre 1 a 2 minutos. O tratamento de conversão é constituído por uma mistura de compostos à base de silanos e de ácido fluoro-zircônio.

2.4 Revestimento por pintura

A pintura é uma das técnicas de proteção mais utilizada, uma vez que é de fácil aplicação e económica. O processo de pintura consiste na aplicação de um esquema, que pode ser uma mistura líquida ou de partículas de pó sobre um substrato que leva à formação de uma película, esta é comumente designada de revestimento^[20].

2.4.1 Tinta e os seus constituintes

As tintas têm presente na sua constituição o veículo fixo, denominado de resina, e o veículo volátil, designado de solvente. Este é a porção que se evapora quando a tinta é aplicada sobre o substrato. A sua constituição pode ser verificada na Figura 2.8.

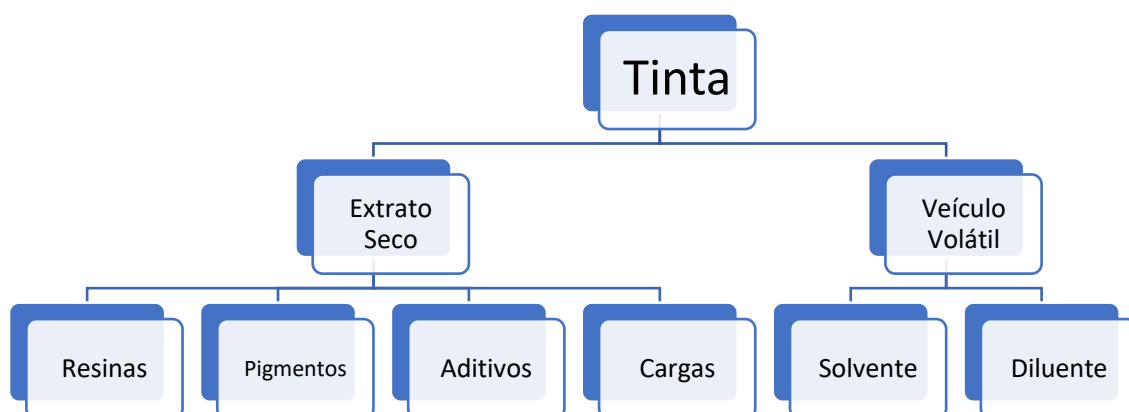


Figura 2.8- Constituintes das tintas

O revestimento utilizado consiste na aplicação de um esquema de pintura multi-camada, que para além de proteger o substrato possui ainda uma função decorativa. O esquema aplicado, bem como as especificações de espessura de acordo com as fichas técnicas no componente automóvel utilizado para a realização desta dissertação é descrito na Figura 2.9^[24,27,28,29]:

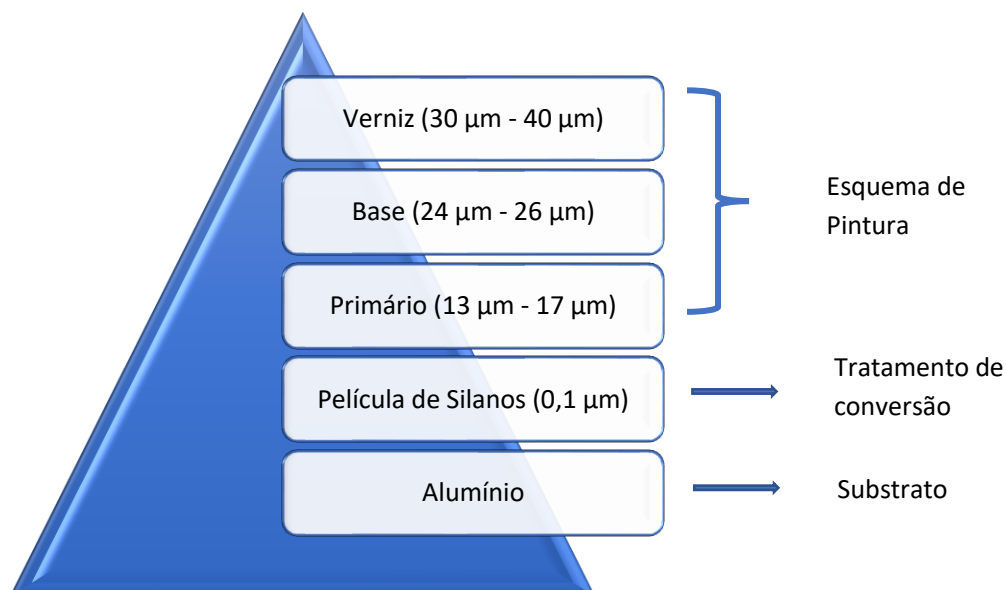


Figura 2.9 - Esquema de pintura e especificações utilizadas

Resina

Esta também designada por ligante, veículo fixo ou polímero, é a principal responsável por manter a ligação entre as partículas sólidas da tinta, ou seja, é a promotora para a formação da película de tinta. Sendo o principal componente inserido no extrato seco (representando 40 a 50% do seu volume), são as suas propriedades que vão determinar o tipo de revestimento que se vai formar, conferindo assim viscosidade, aderência e brilho ao revestimento. Os ligantes influenciam também a flexibilidade, resistência e desgaste ao exterior^{[6],[9],[20]}.

Pigmentos

Os pigmentos são o constituinte que proporciona a cor e a opacidade. Estes existem como partículas finas, e são praticamente insolúveis na resina utilizada.

Os pigmentos auxiliam também na viscosidade da tinta, durabilidade, resistência à corrosão e abrasão, e ainda devem possuir uma boa resistência à exposição atmosférica para que as suas propriedades não sejam alteradas ao longo do tempo^[4,7].

Aditivos

Os aditivos são produtos adicionados às tintas em pequenas quantidades (inferiores a 5% da massa de tinta) para conferir propriedades físicas ou químicas específicas ao revestimento ou até mesmo ao seu armazenamento.

Estes podem ser utilizados para facilitar o fabrico, melhorar a estabilidade da tinta na embalagem, facilitar a agitação, promover aderência, fornecer uma maior elasticidade, e aumentar a velocidade de secagem.^{[6],[9]}

Cargas

As cargas, comumente carbonatos, silicatos, sílicas e sulfatos, devem igualmente ser adicionadas em pequenas quantidades, pois podem tornar a tinta muito porosa e pouco aderente diminuindo assim a sua qualidade.

Estas são compostos inorgânicos insolúveis na resina com a função de dar corpo à tinta, aumentando o seu volume a um preço reduzido, fornecendo ainda importantes propriedades como o brilho, resistência à abrasão, viscosidade e dureza. No entanto, o seu poder de cobertura não é tão eficiente como o facultado nos pigmentos^[7,21].

Solvente e diluente

O solvente é um líquido simples ou uma mistura de líquidos, que faz parte do veículo volátil, sendo utilizado para diminuir a viscosidade da tinta e permitindo assim uma aplicação ao substrato mais eficiente. Na indústria das tintas, os solventes são utilizados nas diversas fases de fabrico, pois além de possibilitar a aplicação do material de revestimento, devem ter a capacidade de molhar e penetrar no substrato arrastando os componentes sólidos que, após evaporação do solvente ajudam a tapar quaisquer fissuras, espaços vazios ou irregularidades^[29].

Nas tintas à base de solventes orgânicos são utilizados hidrocarbonetos (alifáticos ou aromáticos), álcoois e esteres. A sua escolha deve ser adequada ao tipo de resina e pigmento, uma vez que tanto a resina como os pigmentos devem ser solúveis no solvente utilizado, no entanto este não deve reagir com os restantes constituintes da tinta. Existe um solvente “ideal” ou uma mistura de solventes que torna a homogeneização do produto final mais eficaz e influencia as propriedades como a viscosidade, o brilho e a elasticidade^[4,7,21].

O diluente é um líquido orgânico que se adiciona à tinta durante o processo de fabrico ou até mesmo no momento da aplicação, com o objetivo de conceder à tinta as características adequadas como por exemplo a viscosidade. No entanto, é de extrema importância ter atenção às quantidades utilizadas, uma vez que uma diluição insuficiente pode causar a “casca de laranja” e quantidades excessivas de diluente ou até mesmo a utilização de um produto não recomendado, pode dar origem a zonas baças ou acumulações que alteram o aspeto final do produto pretendido.

Posto isto, o solvente tem com finalidade principal dissolver os constituintes sólidos das tintas e os diluentes reduzem a viscosidade da tinta.

2.4.2 Primário

Sendo o primário a primeira camada a ser aplicada após o pré-tratamento, este deve originar uma superfície lisa e adequada para a posterior aplicação das restantes camadas (base e verniz).

No ramo Automóvel o primário é muitas vezes aplicado com o propósito de auxiliar a proteção contra a corrosão, impedindo que esta se propague, bem como garantir uma maior resistência aos danos mecânicos e melhorar a aderência entre o substrato e as camadas seguintes. O primário contribui também para o valor estético do produto final, uma vez que o seu objetivo é eliminar as irregularidades da superfície.

Segundo a bibliografia já foi desenvolvido e caracterizado um primário anticorrosivo para metais^[20].

2.4.3 Base

A base é considerada um produto pigmentado, que tem como objetivo principal dar cor ao esquema de pintura, esta é aplicada sobre o primário e será posteriormente coberta pelo verniz que lhe irá dar uma maior proteção à exposição ambiental.

Essencialmente, as bases são compostas por duas fases: um extrato seco (composto pelas resinas, pigmentos e aditivos, podendo ainda incluir cargas) e um veículo volátil (composto por solventes e diluentes – parte líquida que se evapora durante a cura). Estas duas fases interagem física e quimicamente entre si, conferindo à tinta as propriedades necessárias para um bom desempenho^[21,30].

2.4.4 Verniz

O verniz, sendo a última camada a aplicar no esquema de pintura é que vai conferir boa aparência e brilho (caso este seja um requisito estético). Esta camada não contém pigmentos, e sendo a última camada em contacto com os agentes externos é necessário que seja resistente às agressões mecânicas, influência dos solventes, agentes químicos e condições atmosféricas^[7,21].

O verniz pode ser formulado por vários tipos de resinas: acrílicas, de poliuretano, e poliuretano com poliéster, entre outras. As formulações podem ser divididas como 1K (um componente que reage à temperatura ambiente) e 2K (dois componentes – resina e endurecedor que funciona como catalisador da reação). Na Europa é maioritariamente utilizado verniz à base de poliuretano 1K e 2K^[23].

Cura

O passo essencial na transição da pintura líquida para um revestimento sólido ocorre fundamentalmente devido às alterações e propriedades reológicas da mistura.

A formação do revestimento final, comumente denominada por cura, pode ocorrer por secagem física e/ou por cura química.

Na secagem física o processo é baseado na evaporação do solvente de modo a obter um revestimento sólido, já na cura química o revestimento é obtido através da reação entre a resina e o agente de cura.

A cura via secagem física (Figura 2.10) baseia-se na solidificação do polímero e obtenção da dureza física através da emissão de solventes a partir de soluções poliméricas. Esta prática não é muito eco-friendly uma vez que liberta compostos orgânicos voláteis (COV's) resultantes das reações de polimerização. Deste modo, as tintas de secagem física têm um baixo teor de sólidos, devido à elevada emissão durante a sua aplicação. No entanto, este processo destaca-se pela vantagem de se poder efetuar a cura à temperatura ambiente.

As tintas utilizadas como exemplo de secagem física são os acrilatos termoplásticos, os derivados de celulose como é o caso do nitrato de celulose, acetobutirato de celulose e borracha^[1,21].

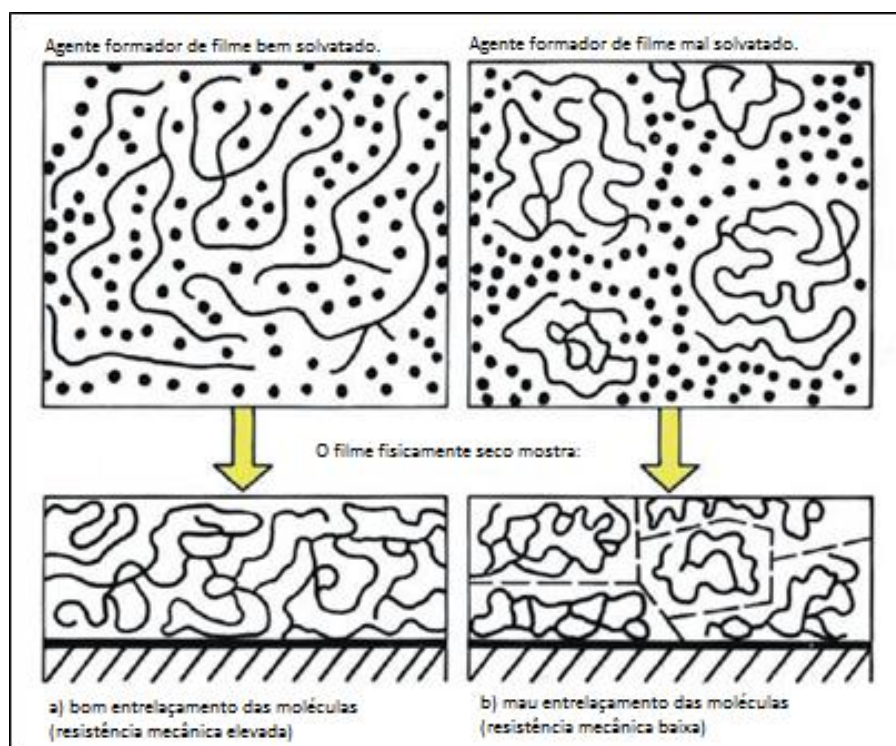


Figura 2.10 - Distribuição molecular antes e depois da reticulação^[3]

Enquanto que a secagem física abrange a mudança do estado do filme devido à evaporação de solventes, a cura química refere-se à mudança estrutural das moléculas da resina, criando novas ligações químicas, levando à reticulação do filme (Figura 2.11).

A reticulação pode ocorrer por reações de poliadição ou policondensação. Como exemplos de materiais de revestimento que curam por policondensação temos as tintas à base de resinas alquídicas ou acrílicas em conjunto com resinas fenólicas ou de melamina.

Neste caso devido ao baixo peso molecular dos agente formadores, a tinta possui um maior conteúdo sólido no estado da aplicação^{[3],[20]}.

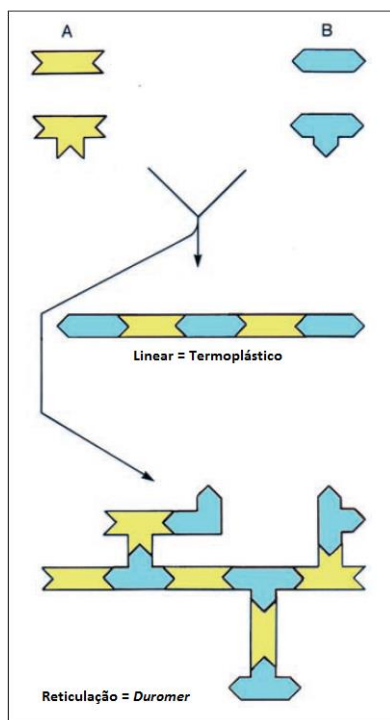


Figura 2.11 - Esquema de ligação e reticulação através da cura química^[3]

Para se adquirir um revestimento com máxima estabilidade química e física é necessária a junção destes dois tipos de cura, sendo necessário investimentos adicionais ao processo, no entanto a qualidade do revestimento acabará por justificar esta abordagem^[3].

O objetivo da cura é a obtenção de um revestimento resistente, para isto recorre-se a estufas de temperatura onde ocorrem os dois mecanismos anteriormente referenciados (cura química e física). A estufa deve estar estabilizada, de modo a proporcionar uma curva de temperatura que cumpra os limites impostos pelo fornecedor (patamares de cura), estando assim adaptada à massa da peça e à velocidade do transportador.

Na indústria automóvel existem estufas que efetuam cura por radiação (infravermelhos ou ultravioleta) e por convecção. Na *Caetano Coatings* o revestimento é curado numa estufa de convecção, constituída internamente por painéis modulares com isolamento térmico, sistemas de distribuição de ar para garantir a homogeneidade do ar quente e cortinas de ar para auxiliar na retenção do ar quente aquando a abertura das portas, consequente do movimento do transportador.

É fundamental o controlo do tempo do transportador de modo a garantir que as peças permanecem o tempo necessário na estufa para completarem a cura^{[9],[31]}.

2.4.5 Técnica de aplicação – Electroestática

A técnica de aplicação utilizada no processo de pintura é determinante para as características do produto final. O aspeto fulcral da aplicação centra-se na eficiência da transferência da tinta, ou seja, na relação entre a quantidade de tinta que sai da pistola e a que efetivamente se deposita na peça^[32].

A linha de pintura líquida da *Caetano Coatings* utiliza tecnologia de ponta, tendo presente nas suas instalações robots para aplicação com electroestática. Este sistema permite que seja utilizada uma quantidade de tinta menor para a pintura de uma peça comparativamente aos outros

Estudo de Causas Raiz na Falha de Aderência em Revestimentos Aplicados em Ligas de Alumínio

métodos mencionados na Tabela 2.7, deste modo é possível minimizar o *overspray* (quantidade de tinta desperdiçada durante a pintura).

Tabela 2.7 - Eficiência da transferência de tinta de acordo com as diferentes tecnologias^[32]

Método de aplicação	Tecnologia não compatível				Eficiência mínima de 65% (Scaqmd ¹)	Tecnologia compatível			
	30%	40%	50%	60%		70%	80%	90%	
Atomização por ar comprimido	[Barra azul]								
Atomização hidráulica	[Barra azul]								
HVLP						[Barra azul]			
Electroestática						[Barra azul]			

A pintura por electrostática é assim a que apresenta maior eficiência contra o desperdício de tinta bem como na aplicação de revestimentos a peças com uma geometria mais complexa. Esta técnica consiste no carregamento das partículas da tinta através de um campo elétrico com uma voltagem entre os 2000 e 10000 Volts que são descarregados contra a peça também ela com uma carga associada. Deste modo, a tinta carregada negativamente é atraída para a carga positiva presente no substrato (Figura 2.12)^[32].

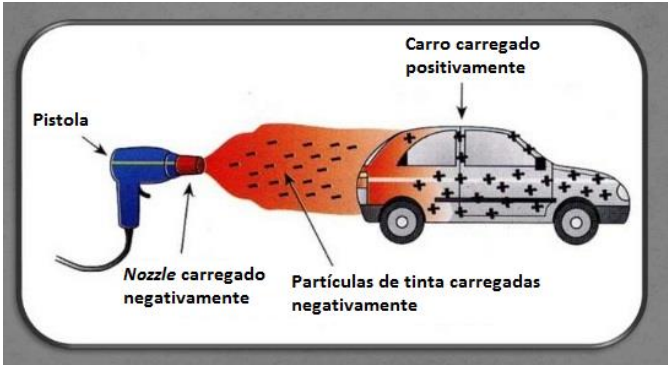


Figura 2.12 - Mecanismo de aplicação electrostática^[33]

A preparação da tinta, seleção da pistola de pulverização e condições ambientes são variáveis importantíssimas no processo de aplicação, juntamente com a distância, ângulo e velocidade de aplicação, pressão do ar e número de passagens pela peça. Estes parâmetros influenciam a espessura, brilho e textura do produto final, podendo ainda originar defeitos de pintura como é o caso dos escorridos e casca de laranja. As peças encontram-se suportadas numa estrutura designada por bastidor que permite que estas se movam entre as cabines de pintura evitando todo o manuseamento manual das peças húmidas, de modo a evitar o acabamento defeituoso da peça e problemas de aderência^[32,34].

¹ Scaqmd - South coast air quality management district (Agência de controlo de poluição atmosférica dos Estados Unidos da América)

2.5 Caracterização do revestimento

A caracterização dos revestimentos é muito importante, uma vez que permite avaliar se o comportamento das peças revestidas cumpre os requisitos definidos para a sua aplicação futura.

Seguidamente serão abordadas várias técnicas de caracterização realizadas na parte experimental desta dissertação. É de salientar que alguns dos ensaios realizados estão de acordo com a norma regente do projeto.

2.5.1 Tensão superficial

A tensão superficial consiste na interação das propriedades reológicas, sendo a variável física mais importante na evolução do revestimento.

As forças coesivas são geradas pelas forças de Van der Waals e são consequência das forças de dispersão e dipolo em conjugação com as ligações por ponte de hidrogénio. Estas forças são iguais em qualquer direção espacial e consequentemente a sua resultante é igual a zero.

O método de medida da tensão superficial dos líquidos é o tensiómetro, que nos permite medir quantitativamente a tensão superficial estática, obtendo uma leitura direta da força aplicada em mN/m.

Na medição da tensão superficial foi utilizado o método do anel (de platina), sendo medida a força necessária para remover o anel da superfície da solução^[3]. O mecanismo encontra-se ilustrado na Figura 2.13.

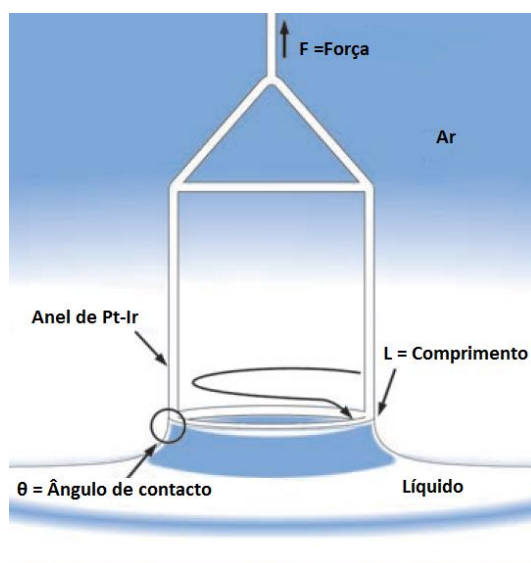


Figura 2.13- Mecanismo de medição da tensão superficial^[3]

2.5.2 Ângulo de contacto

De acordo com Young, a molhabilidade dos substratos por líquidos pode ser determinada através do ângulo de contacto entre a fase sólida e a líquida, como ilustrado na Figura 2.14. Uma boa molhabilidade é alcançada quando este ângulo de contacto é muito pequeno, o que significa que a gota de líquido se espalhou, cobrindo uma grande área da superfície sólida.

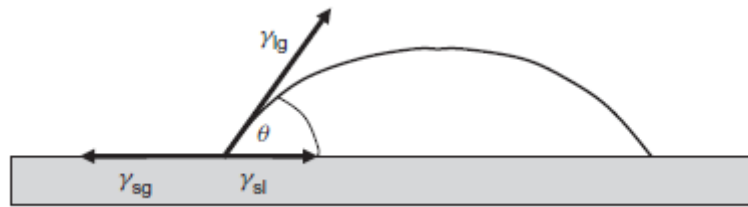


Figura 2.14 - Ângulo de contacto e tensão superficial segundo Young^[23]

Ângulos de contacto pequenos são promovidos pela alta tensão superficial do sólido e/ou baixa tensão superficial do líquido, como se pode verificar na Equação 1 - Equação de Young.^[23]

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{gl} \cos \theta$$

Equação 1 - Equação de Young^[23]

γ_{sg} = tensão superficial do sólido (= tensão interfacial sólido/gás);

γ_{sl} = tensão interfacial sólido/líquido;

γ_{lg} = tensão superficial do líquido (= tensão interfacial gás/líquido);

θ = ângulo de contacto.

2.5.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

A espectroscopia de infravermelho (IV) consiste no estudo da interação da radiação infravermelha com a matéria. Esta interação é representada num gráfico que relaciona a intensidade da radiação absorvida pela matéria com o comprimento dessa radiação. Quando a frequência da radiação incidente se aproxima de uma das frequências de um determinado grupo molecular, a amostra absorve energia o que consequentemente origina um pico de absorção no espectro.

Através desta técnica é então possível obter espectros de absorção associados à vibração das ligações químicas dos constituintes das amostras (determinação de espécies, grupos funcionais e ligações).

O equipamento que possibilita estes resultados é denominado por espectrómetro de Infravermelho de Transformada de Fourier (FT-IR)^[35].

2.5.4 Microscopia ótica

A microscopia ótica é uma técnica existente desde o século 18, esta é empregue para a visualização mais próxima e ampliada de um objeto em estudo através de uma lente com luz visível. Existem vários tipos de microscópios associados a esta técnica desde os mais simples aos mais complexos com enumeras óticas de ampliação^[36].

2.5.5 Caracterização segundo a norma regente

A caracterização dos revestimentos é de extrema importância, uma vez que necessitamos de avaliar se o produto final vai de encontro aos requisitos do cliente. Cada projeto tem associado uma norma regente, na qual se encontra toda a informação necessária de ensaios a realizar bem como as classificações permitidas para cada um deles. A norma regente remete também para normas individualizadas (referente ao ensaio respetivo), onde se encontra o procedimento de

ensaio, que deverá ser seguido à risca, e a forma de classificação dos resultados. É ainda de salientar a importância do tempo de cura à temperatura ambiente (72h) para a realização destes ensaios, pois é necessário adquirir uma boa consolidação da pintura^[37].

Nesta dissertação a norma regente utilizada é a GMW 14669 de 2016.

Espessura

A medição da espessura é realizada com o auxílio da ISO 2808 de 2007 e do Elcometer 355 de sonda não ferrosa. É imperativo nestes equipamentos a sua verificação antes de dar início às leituras. A verificação deverá ser de acordo com as instruções do fabricante e realizada dentro do intervalo de espessuras esperado para o revestimento.

As medições devem ser realizadas ao longo de toda a peça e nas diversas faces, sendo posteriormente considerada o valor da espessura média^[38].

Aderência

O ensaio de aderência pelo método da quadrícula foi realizado de acordo com a norma GMW 14829 de 2006. Este ensaio permite avaliar a eficiência do revestimento ao substrato, bem como o seu comportamento entre camadas.

As amostras em condições de “após pintura” e antes do ensaio de aderência devem estar isentas de óleos, gorduras ou outros resíduos na superfície.

O ensaio tem início após a medição da espessura da peça, seguidamente identifica-se o número de linhas e espaçamento entre linhas a utilizar no revestimento com o auxílio da Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Guia de corte para a aderência^[39]





Espessura do revestimento (μm)	Espaçamento (mm)	Número de cortes (em cada direção)
≤ 60	1	6
60 a 200	2	6
≥ 200	3	6

Devem ser efetuados todos os cortes ao longo de 20 mm de comprimento de peça, sendo que estes têm de ser realizados com uma pressão suficiente capaz de atingir o substrato. Após se ter feito as várias quadrículas, a superfície deve ser limpa com uma escova suave.

Em seguida, e de forma a cobrir toda a quadrícula é utilizada fita adesiva com a referência 3M 898. Após a aplicação é necessário fazer alguma pressão (passando firmemente o dedo) e passados 5 a 10 segundos deve-se remover a fita adesiva com um movimento rápido e contínuo, de forma a que este seja diagonal à superfície.

Deste modo, a peça estará pronta para ser examinada e classificada de acordo com o rating adequado disponível na Tabela 2.9^[39].

Tabela 2.9 - Classificação da aderência de acordo com o destacamento^[39]

Classificação	Descrição	Aspetto da quadricula
0	Nenhum dos quadrados da quadricula se destacou	Nenhum
1	Destacamento do revestimento nas interseções das incisões que não afeta mais de 5% da quadricula.	
2	O destacamento destacou-se ao longo dos bordos das interseções das incisões afetando nitidamente entre 5 a 15% da quadricula.	
3	O destacamento destacou-se ao longo dos bordos das interseções das incisões, em parte ou na totalidade em faixas largas ou destacou-se em parte ou na totalidade em diversas zonas das quadriculas afetando entre 15 e 35% da quadricula.	
4	O destacamento destacou-se ao longo dos bordos das interseções das incisões, em parte ou na totalidade em faixas largas ou destacou-se em parte ou na totalidade em diversas zonas das quadriculas afetando entre 35 e 65% da quadricula.	
5	Destacamento acima dos 65%.	Acima dos 65%

Ensaio de adequação da cura

Este ensaio permite avaliar se a cura do revestimento foi ou não adequada. Para tal, é utilizado um solvente (etanol 96%) que é colocado numa amostra de gaze. Caso a cura do revestimento não tenha sido a adequada iremos verificar a coloração na amostra de gaze utilizada.

As amostras testadas devem ter no mínimo uma dimensão de 10 cm x 10 cm e seguindo o procedimento presente na norma GMW 15891 de 2013.

Para dar início ao ensaio a gaze deve estar dobrada em quatro e saturada do solvente adequado. Em seguida, e com o auxílio do dedo indicador será imposta uma pressão firme e constante em 10 movimentos contínuos. A amostra é então avaliada segundo a Tabela 2.10, de acordo com a superfície de pintura após a realização do teste e pelos resíduos que ficam na gaze^[40].

Tabela 2.10 - Classificação de acordo com as alterações do verniz^[40]

Classificação	Superfície com verniz
0	Sem alteração
1	Uma neblina pouco observável
3	Moderado: neblina moderada
5	Severo: Neblina muito óbvia

Resistência à humidade e condensação constante

Este ensaio de acordo com a norma GMW 14729 de 2007 tem como objetivo observar o comportamento das peças revestidas, e sendo considerado um ensaio de envelhecimento acelerado permite ter uma ideia do comportamento que o material poderá ter ao longo do tempo. Apesar de esta simulação não passar disso mesmo, os resultados obtidos podem ser considerados como uma aproximação à realidade.

As amostras são colocadas numa câmara de humidade capaz de produzir $40 \pm 3^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa de aproximadamente 100%. Após a exposição de 120h é realizado um ensaio de

aderência segundo o procedimento já descrito, bem como a verificação da alteração da superfície (empolamentos). Na avaliação às 240h são apenas avaliadas as alterações na superfície (ausência ou não de empolamentos)^[41].

Ensaio de Nevoeiro Salino

O ensaio de nevoeiro salino é realizado segundo a norma GMW 14872 de 2013 e considerado um ensaio de resistência à corrosão que se pode equiparar ao ensaio de corrosão cíclica.

Para este ensaio é necessária a preparação de uma solução de Cloreto de Sódio (NaCl) de acordo com o requerido. É realizado um corte na peça até ao substrato para se verificar posteriormente a presença ou não da corrosão. As amostras são colocadas no equipamento que efetua a pulverização da solução preparada. A quantidade de spray aplicada deve ser suficiente para cobrir visivelmente a zona de corte e com um espaçamento mínimo de pulverizações de 1h entre a anterior e a subsequente. O ensaio tem a duração de 336h^[42].

Corrosão Filiforme

A corrosão filiforme é um ensaio com o objetivo de avaliar a resistência das mudanças de processo e do material. O ensaio é realizado de acordo com a norma GMW 15827 de 2013. Neste ensaio é igualmente necessária a preparação de uma solução, neste caso uma solução cupro acética. As amostras com um corte até ao substrato são colocadas numa câmara de pulverização idêntica à de nevoeiro salino e irão estar expostas à solução e a uma temperatura de 60°C durante 6h

Posteriormente, as amostras são transferidas para a câmara de humidade onde permanecerão durante 672h. É necessária uma avaliação semanal durante o decorrer do ensaio^[43].

Resistência ao risco

O ensaio de resistência ao risco é realizado de acordo com a norma GMW 14698 de 2012. O procedimento consiste na colocação da amostra na câmara de humidade e após a realização do teste, é aplicada uma força de 4N ao revestimento para determinar se ocorre alterações em relação à sua dureza^[44].

Resistência ao deterioramento da superfície por mudança de cor (resistência aos químicos)

A resistência aos químicos consiste na avaliação do revestimento aplicado. Este ensaio é realizado de acordo com a norma GMW 14701 de 2011 e permite-nos observar o comportamento do revestimento a químicos de contacto comum com a peça automóvel.

Os químicos testados são o óleo de motor, fluído de limpa para brisas, fluído de travões, glicol e anticongelante. O ensaio é realizado durante 24h à temperatura ambiente.

A sua avaliação é efetuada visualmente e de acordo com a seguinte escala disponível na Tabela 2.11^[45].

Tabela 2.11 - Classificação da alteração visual após o ensaio dos químicos^[45]

Classificação	Alteração do revestimento
10	Sem alterações
8	Alteração ligeira
6	Alteração moderada
4	Alteração pronunciada
2	Alteração severa

Capítulo 3 - Metodologia, Materiais e Métodos

Nesta dissertação serão utilizadas ferramentas da qualidade juntamente com a metodologia *Shainin*, de modo a auxiliar na elaboração de uma estratégia estruturada para a resolução de diversos mecanismos de falha que podem ocorrer durante o processo de pintura. Assim sendo, foram realizados diversos testes provocando mecanismos de falha para posteriormente se analisar a resistência do revestimento.

3.1 Ferramentas de Qualidade

Através da elaboração de um fluxograma do projeto foi possível identificar diversos pontos onde podem ocorrer falhas, tendo sido estes estudados mais aprofundadamente.

Assim sendo, a ideia da realização destes testes partiu de uma equipa pluridisciplinar, uma vez que se deve reunir todas as pessoas relacionadas e afetadas com o problema, devido à necessidade de conhecer muito bem o processo e produto em estudo, pelo que foram realizadas reuniões de *Brainstorming*. Nestas sessões de 30 minutos foi possível trocar ideias com o operador de banhos e responsáveis dos seguintes setores: Engenharia, Laboratório, Qualidade, Produção e Manutenção, tendo como foco o preenchimento do diagrama de *Ishikawa* e a tabela *5W2H*, bem como o debate de soluções para a resolução dos problemas encontrados.

Com a identificação das causas raiz presentes no diagrama de *Ishikawa*, foi necessária a utilização de uma ferramenta que ajudasse a compilar esta informação e as respetivas soluções. Deste modo, recorreu-se ao preenchimento da tabela *5W2H* por toda a equipa.

Tendo em conta o diagrama de *Ishikawa* efetuado durante as sessões, decidiu-se efetuar um conjunto de testes para despiste, utilizando como referência um padrão (peças de produção normal), designado de teste A.

3.2 Caracterização do revestimento

Para despistar os problemas associados ao pré-tratamento (produtos inadequados, mal acondicionamento, erro no programa de acordo com o tipo de material, falha nas bombas, entre outros) efetuaram-se dois testes. O teste B que consistiu na limpeza das peças com álcool antes da entrada no túnel, de modo a limpar a peça de resíduos de óleo existentes. **Teoria:** Uma camada de óleo em excesso poderia não conseguir ser removida através das etapas de desgorduramento e lavagem e consequentemente causaria um tratamento insuficiente na desoxidação e silanos, podendo levar a problemas de aderência. No teste C efetuou-se o pré-tratamento existente na linha 1 (Pintura a pó) e seguiu-se com a pintura na linha 8. **Teoria:** Comparação da eficiência do pré-tratamento da linha 1 relativamente ao da linha 8. A linha 1 comporta um desgorduramento alcalino enquanto que na linha 8 o desgorduramento existente é ácido. A comparação dos parâmetros de cada estágio em cada linha encontra-se no anexo A.

Já o teste D consistiu na simulação de uma paragem de linha, não devendo ser esta provocada porque poderá colocar em risco toda uma produção, o procedimento utilizado foi a passagem das peças pelo pré-tratamento e quando se chegou à parte dos silanos em vez de existir uma passagem pelos pulverizadores as peças estiveram em imersão no banho durante 30 minutos. A sua caracterização foi posteriormente realizada seguindo a norma da GMW como nos restantes testes. Outro teste efetuado (Teste E) foi a passagem de peças sem pré-tratamento, ou seja, as peças não passaram pelos banhos do desgorduramento, desoxidações e silanos, apenas passaram pela última água de lavagem e seguiram o processo normal até à pintura líquida.

Posteriormente, foram efetuados mais testes de despiste que não foram caracterizados na totalidade, apenas se procedeu ao ensaio de aderência.

A Tabela 3.1 ilustra todas as situações que foram simuladas.

Tabela 3.1 – Testes realizados

Testes	
A	Produção Normal (Padrão)
B	Limpeza das peças com álcool antes da entrada no túnel de pré-tratamento
C	Pré-tratamento Linha 1 + Pintura Linha 8
D	Pré-tratamento + 30min de imersão nos silanos
E	Peças pintadas sem a passagem pelo túnel do pré-tratamento
F	Aplicação sem primário – Só endurecedor
G	Aplicação de primário sem endurecedor
H	1h de paragem no forno de cura
I	Base aplicada com diluente de limpeza
J	Primário com diluente de limpeza
K	Falha na eletrostática
L	Aplicação de primário sem <i>flash-off</i>
M1	1h de paragem no forno de secagem
M2	<i>Bypass</i> ao forno de secagem
N1	Aplicação de óleo, passagem das peças pelo pré-tratamento e pintura com endurecedor (sem primário)
N2	Aplicação de óleo, <i>bypass</i> ao pré-tratamento e pintura com endurecedor (sem primário)
N3	Peças limpas com álcool, pré-tratamento e pintura com endurecedor (sem primário)
N4	Peças limpas com álcool, <i>bypass</i> ao pré-tratamento e pintura com endurecedor (sem primário)
O1	Aplicação de óleo, passagem das peças pelo pré-tratamento e pintura com primário
O2	Aplicação de óleo, <i>bypass</i> ao pré-tratamento e pintura com primário
O3	Peças limpas com álcool, pré-tratamento e pintura com primário
O4	Peças limpas com álcool, <i>bypass</i> ao pré-tratamento e pintura com primário

A realização destes testes permitiu simular erros de operador e de linha, levando a situação quase ao extremo de modo a verificar a sua influência na aderência inicial das peças. As peças antes de chegarem à nossa linha de pintura líquida são cortadas e maquinadas de modo a obter o design do perfil pretendido, pelo que se colocou a hipótese destes óleos estarem presentes em excesso na peça e o pré-tratamento não ser eficiente e impedir além de outras coisas, a deposição da camada dos silanos.

A medição da tensão superficial e dos ângulos de contato foi realizada com o apoio do laboratório do departamento de química da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

3.2.1 Tensão superficial

Na medição da tensão superficial da solução foi utilizado um Tensiómetro da marca Sigma, sendo realizadas medições com diversos reagentes como se pode verificar na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Reagentes utilizados na medição da tensão superficial

Reagente	ρ (g/cm ³)
Água destilada	0,99707
Glicerol	1,258
Dietileno glicol	1,118
Etileno glicol	1,113
Primário A	1,120
Primário B	1,082

O valor da tensão superficial é dado em mN/m e a sua leitura é realizada diretamente do visor do aparelho. Deverá proceder-se a uma limpeza eficiente do anel e do recipiente utilizado para colocar os líquidos a medir, de modo a evitar qualquer tipo de contaminações que possam influenciar o resultado final.

O equipamento utilizado encontra-se ilustrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Tensiômetro

3.2.2 Ângulos de contacto

Para a medição dos ângulos de contato foi utilizado um goniómetro da marca KSV, uma seringa B-Braun de 1 mL e uma agulha de aço inoxidável com ponta reta de 12,7 mm de comprimento e 0,84 mm de diâmetro interno.

Colocou-se 1 mL de cada solução nas seringas e colocou-se a seringa no suporte do goniómetro. Seguidamente, efetuou-se pressão no êmbolo da seringa de modo a libertar pequenas gotas ao longo da peça e registou-se a medição de cada uma das gotas com a câmara que está acoplada ao goniómetro. As medições apenas foram possíveis devido à utilização do *software* do equipamento onde se realizaram 5 medições em 10 intervalos distintos.

O equipamento bem como o *software* utilizado para a determinação dos ângulos de contacto encontra-se representado na Figura 3.2.

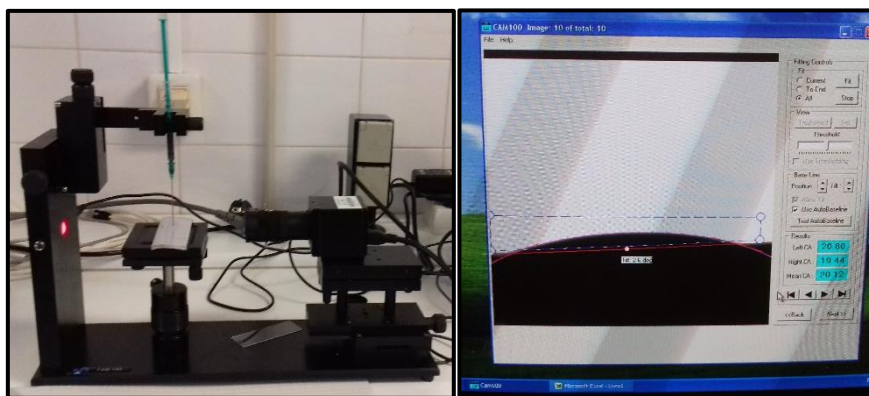


Figura 3.2 - Goniômetro e respectivo software

3.2.3 FTIR

A análise química qualitativa das amostras foi realizada pelo método de reflexão de infravermelhos com transformada de Fourier (FTIR). No entanto, foram utilizados dois equipamentos diferentes uma vez que foram realizados em dois laboratórios externos distintos.

O primeiro laboratório utilizou o equipamento PerkinElmer modelo Spectrum Two, já o segundo utilizou o método de reflectância total atenuada (ATR) usando o equipamento Shimadzu IR Prestige-21. Este equipamento tem uma faixa espectral entre os 4000 e 750 cm^{-1} , com 20 leituras e uma resolução de 4,0 cm^{-1} .

3.2.4 Perda de massa

Determinação da Perda de Massa de Alumínio após Tratamento nas Etapas de Desengorduramento e Desoxidação de acordo com a IMCM do fornecedor^[46]

Princípio: Observação da capacidade do desengorduramento e desoxidação em banhos ácidos na remoção de alumínio, de modo a prever a eficácia do tratamento quer em termos de limpeza, quer na eliminação de elementos contaminantes presentes na superfície do metal aquando da sua produção.

Campo de aplicação: O método é utilizado em peça ou provete, desde que estes apresentem um peso inferior a 200g, para se poder fazer uso de uma balança analítica.

Procedimento:

- 1 - Limpar a peça/provete de alumínio fazendo uso a um solvente embebido em papel ou trapo, secar posteriormente com ar comprimido isento de óleo;
- 2 – Pesar na balança analítica e registar o seu peso em gramas (Pi);
- 3 – Proceder à passagem do provete/peça pela linha de pré-tratamento (desde o pré-desengorduramento até à lavagem posterior à desoxidação II);
- 4 – Lavar com água desmineralizada abundantemente e secar com ar comprimido isento de óleo;
- 5 – Proceder novamente à pesagem na balança analítica e indicar o peso final da peça/provete em gramas (Pf);
- 6 – Determinar a sua área, tendo em atenção de que num provete de alumínio são considerados os dois lados e indicar com A o seu valor em m^2 .

Deste modo a equação utilizada para o cálculo da perda de massa resume-se a:

$$\text{Perda de Massa} \left(\frac{g}{m^2} \right) = \frac{(P_i - P_f)}{A}$$

3.2.5 Ensaios da norma regente

Espessura

Antes de se submeter a peça a qualquer tipo de ensaio é estritamente necessário efetuar a medição da espessura do revestimento, de modo a compreender se a mesma se encontra de acordo com a especificação (espessuras recomendadas pelo fornecedor). Neste caso a espessura medida foi a total, que contempla primário, base e verniz. O ensaio foi realizado segundo a norma ISO 2808 de 2007 utilizando o equipamento Elcometer 355, como é possível verificar na Figura 3.3. Este aparelho de calibração interna, possui uma sonda de leitura para metais não ferrosos. Durante o ensaio são efetuadas várias leituras ao longo de toda a peça e das várias faces fazendo-se posteriormente uma média das espessuras medidas.



Figura 3.3 - Elcometer 355 e sonda não ferrosa

Aderência

De acordo com a norma da GMW 14829 de 2006 é necessário à *priori* conhecer a espessura do revestimento, uma vez que o ensaio de aderência é realizado de acordo com este parâmetro (Tabela 2.8). O espaçamento entre quadrículas bem como o seu número é selecionado tendo em conta a média da espessura total da peça. Com o auxílio de um cortante (Elcometer 107 – visível na Figura 3.4), neste caso de 6 pentes e 2mm de espaçamento, efetuou-se um corte paralelamente à peça e outro na sua perpendicular, de modo a garantir à quadrícula um ângulo de 90°. Por último colocou-se diagonalmente sobre a quadrícula fita adesiva Scotch 898 3M, procedeu-se à remoção do ar presente entre a fita e a peça e puxou-se a fita de uma só vez. Terminando com a avaliação do destacamento segundo a Tabela 2.9.



Figura 3.4 - Elcometer 107 e fita adesiva Scotch 898 3M

Ensaio de adequação da cura

Para o ensaio da cura foi utilizada gaze dobrada em 4 partes e saturada em etanol (96%), como ilustrada na Figura 3.5, e de acordo com a norma GMW 15891 de 2013 foram efetuados 10 movimentos contínuos, para a frente e para trás, exercendo uma pressão sobre a superfície. O ensaio foi finalizado com a sua avaliação concordante com a Tabela 2.10.



Figura 3.5 - Etanol a 96% e gaze

Resistência à humidade e condensação constante

Para a realização do ensaio de resistência à humidade recorreu-se à norma da GMW 14729 de 2007 com o auxílio da câmara de humidade Erichsen Testing Equipment modelo Hygrometer 519 - Figura 3.6. O equipamento simula um ambiente de humidade saturada, atingindo aproximadamente os 100% de humidade relativa e os 40° de temperatura.

As peças sofreram avaliação após 120 e 240 horas de exposição neste ambiente, sendo efetuado o ensaio de aderência na primeira avaliação recorrendo à tabela 6, e uma avaliação visual no ensaio mais longo.



Figura 3.6 - Câmara de condensação constante e humidade

Ensaio de Nevoeiro Salino

O ensaio de nevoeiro salino foi realizado segundo a norma GMW 14872 de 2013 numa câmara de nevoeiro salino com capacidade de 1000 litros, modelo 606 da Erichsen. Após a exposição das amostras por um período de 336h é avaliada a presença ou não de corrosão. O corte efetuado nas peças submetidas a este ensaio é realizado com um cortante de ponta em V e 1mm de espessura, o corte terá de ser profundo ao ponto de se verificar o substrato. O equipamento utilizado é ilustrado na Figura 3.7 e Figura 3.8.



Figura 3.7 - Cortante utilizado na realização do corte

Preparação da solução:

É necessário preparar uma solução com uma concentração de 50 ± 5 g/L de cloreto de sódio p.a (NaCl) dissolvido em água desmineralizada. Esta solução deverá ser incolor e apresentar um pH entre 6-7.

Parâmetros controlados:

- Data da preparação da solução;
- Massa de cloreto de sódio (g NaCl);
- Condutividade da água ($\mu\text{S}/\text{cm}$);

- Volume solução (litros);
- Concentração da solução na cuba (g/L);
- Concentração da solução coletada (g/L);
- pH da solução na cuba;
- pH da solução coletada;
- Pressão (bar);
- Volume coletado (mL/h);
- Temperatura (°C);
- Lote do cloreto de sódio e grau de pureza.



Figura 3.8 - Câmara de Nevoeiro Salino

Corrosão filiforme

No ensaio da corrosão filiforme segundo a norma GMW 15287 de 2013 as amostras terão de permanecer 6 horas numa câmara de nevoeiro salino cupro acético, denominada CASS TESTE. Esta câmara da Erichsen modelo 606 com uma capacidade de 400 litros (Figura 3.9) trabalha a uma temperatura de 60°. O ensaio tem depois continuação com uma exposição à humidade de acordo com o procedimento já referido de 672h. Semanalmente, até se completarem os 28 dias de duração do teste é realizada uma avaliação de modo a verificar a existência ou não de corrosão. Neste teste é igualmente necessário efetuar um corte nas peças que é realizado com um cortante de ponta em V e 1mm de espessura, o corte terá de ser profundo ao ponto de se verificar o substrato.

Preparação da solução:

É necessário preparar uma solução com uma concentração de 50 ± 5 g/L de cloreto de sódio p.a (NaCl) dissolvido em água desmineralizada. Esta solução deverá ser incolor e apresentar um pH entre 6-7.

Seguidamente pesa-se uma pequena quantidade de cloreto de cobre (II) dihidratado ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) que deve ser dissolvido na solução salina (preparado anterior), de modo a obter-se uma concentração de $0,26 \pm 0,02$ g/L. Verificar o pH da solução.

Adicionar um volume suficiente de ácido acético glacial à solução de forma a obter-se um pH compreendido entre 3,1 e 3,3.

Nota: Para se efetuar as correções necessárias deverá ser adicionado Hidróxido de Sódio p.a (NaOH) caso seja necessário subir o pH e ácido acético como referido (CH_3COOH) para baixar o pH.

Parâmetros controlados:

- Data da preparação da solução;
- Massa de cloreto de sódio (g NaCl);
- Massa de cloreto de cobre dihidratado (g $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);
- Condutividade da água ($\mu\text{S}/\text{cm}$);
- Volume solução (litros);
- Concentração da solução na cuba (g/L);
- Concentração da solução coletada (g/L);
- pH da solução na cuba;
- pH da solução coletada;
- Pressão (bar);
- Volume coletado (mL/h);
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$);
- Lote do cloreto de sódio e grau de pureza.



Figura 3.9- Câmara de Nevoeiro Salino Cupro Acético

Resistência ao risco

O ensaio de resistência ao risco foi efetuado com o apoio da norma GMW 14698 de 2012 e com o auxílio de um lápis de resistência ao risco da Erichsen modelo 318.- Figura 3.10. Após a exposição das amostras ao ensaio de humidade durante 144h é aplicada uma força de 4N ao revestimento e verifica-se se ocorreu ou não alterações em relação à sua dureza.



Figura 3.10 - Equipamento de resistência ao risco

Resistência ao deterioramento da superfície por mudança de cor (resistência aos químicos)

A resistência aos químicos foi realizada segundo a norma GMW 14701 de 2011, utilizando óleo de motor, líquido do limpa para brisas, fluido dos travões, glicol e anti congelante. De acordo com a norma regente GMW 14669 de 2016, o ensaio deveria ser efetuado recorrendo ao método 1

e 2, no entanto só foi realizado o método 2 uma vez que o laboratório das instalações não tem capacidade de executar o método 1. Deste modo, foram aplicadas duas gotas de cada solução com o auxílio de uma pipeta de Pasteur nas amostras, tendo estas sido acondicionadas durante 24 horas à temperatura ambiente. Após este período as amostras foram limpas com água e bem secas com papel absorvente para se proceder com a sua avaliação de acordo com a tabela 8.

Capítulo 4 - Discussão de Resultados

Inicialmente, identificou-se o problema e tentou-se perceber, como, quando e onde este aconteceu e foi detetado, recorrendo à aplicação da ferramenta 5W, Tabela 4.1, que mostra a síntese de diagnóstico do problema em análise.

Tabela 4.1 - Tabela síntese de diagnóstico do problema

	Fenómeno Inicial	Falha de Aderência
WHAT	Como é que o problema foi detetado?	Problema de aderência numa longarina
	Em que componente foi detetado.	Longarina Cor A
WHEN	Quando é que o problema foi detetado?	23 de Março
WHERE	Onde é que o problema foi detetado?	Zona ao acaso da peça
	Onde é que o problema foi gerado?	Entre a receção e pintura de material virgem
WHO	Quem detetou o problema?	Laboratório CC
	Quem gerou o problema?	Ainda por definir
WHICH	É um problema conhecido ou novo?	Novo
	O número de peças NOK aumentou?	Não

De acordo com a metodologia de Shainin foi realizado o diagrama de *Pareto* presente na Figura 4.1 onde foram consideradas as supostas três causas raiz principais no problema em estudo.

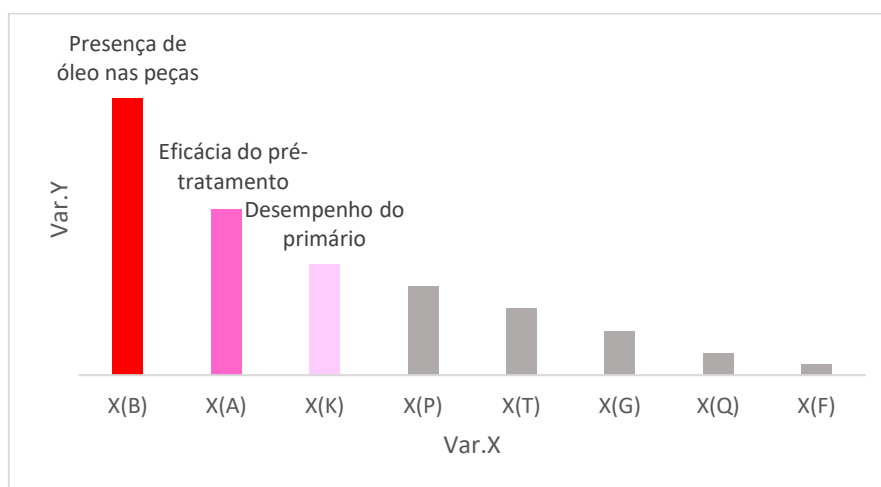


Figura 4.1 - Diagrama de Pareto adequado ao caso de estudo

Desde modo, e tendo em consideração a análise das restantes ferramentas de qualidade utilizadas neste trabalho os testes realizados foram executados de modo a dar prioridade à avaliação de mecanismo de falha devido à presença de óleos nas peças (*RedX*), seguidamente a eficiência do pré-tratamento e o comportamento do primário aplicado.

O fluxograma do processo, Figura 4.4, mostra os pontos sensíveis para a resolução do problema em estudo que foram identificados em reuniões de *brainstorming*, de modo a se ter presente os pontos fulcrais e de especial atenção durante todo o processo. Podem ser identificadas as zonas dos banhos (destacada a laranja), local onde é realizado o pré-tratamento que pode colocar em causa todo o bom desempenho do revestimento, o forno de secagem (representado a amarelo), as cabines de pintura (verde para o primário e azul para a base) e a estufa de cura do verniz (evidenciada a cinza). O fluxograma apresentado ilustra apenas as partes mais críticas do fluxo de processo existente na *Caetano Coatings*, no entanto representa as diversas partes testadas onde podem ocorrer falhas.

Após a identificação das etapas de risco, foi efetuado um diagrama de Ishikawa (ilustrado na Figura 4.3) durante as sessões de *brainstorming* onde estão pormenorizadas as falhas que podem estar associadas a cada etapa (pré-tratamento, estufa de secagem, cabines de pintura e forno de cura).

Aquando a construção deste diagrama ficou estipulado a realização de testes de despiste descritos na Tabela 3.1, tendo em conta as várias áreas que podem ser afetadas e gerar falhas de aderência no revestimento.

Uma das maiores preocupações centrou-se na eficiência da limpeza das peças durante o pré-tratamento. Antes da chegada das peças à *Caetano Coatings* estas sofrem vários processos para atingirem a forma estipulada pelo cliente, assim sendo esta peça de alumínio extrudido, é maquinada, dobrada e cortada recorrendo a equipamentos próprios bem como a óleos para auxiliar no processo. Óleos estes que poderiam ser responsáveis pela falta de aderência do revestimento. A presença de óleos após a etapa de desengorduramento pode gerar uma desoxidação pouco eficaz, ou seja, pode não haver um bom ataque ao alumínio e uma favorável criação de porosidades que promovam uma melhor aderência tanto à camada de silanos, como às camadas de pintura que lhe sucedem.

Desde modo, após a passagem pelo túnel de pré-tratamento verificou-se o estado das peças no forno de secagem onde foi evidente a presença de pequenas quantidades de óleo. Apesar destas serem mínimas podia-se estar perante uma das causas dos destacamentos. Aquando da saída das peças foram esperadas 72h como refere a norma, para se proceder ao ensaio de aderência. Neste ensaio, obteve-se um destacamento classificado como Gt5 de acordo com a Tabela 2.9 e visível na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Película destacada e enviada para análise

Analisando a olho nu a película destacada esta apresentava-se um pouco maleável e com aspeto gorduroso, pelo que se decidiu comparar através de uma análise química qualitativa a amostra destacada com a amostra de óleo, de modo a verificar a presença deste na película destacada, com o objetivo de associar a falha de aderência à presença de óleo na peça. Com o auxílio da Tabela 4.2 efetuou-se a análise pretendida.

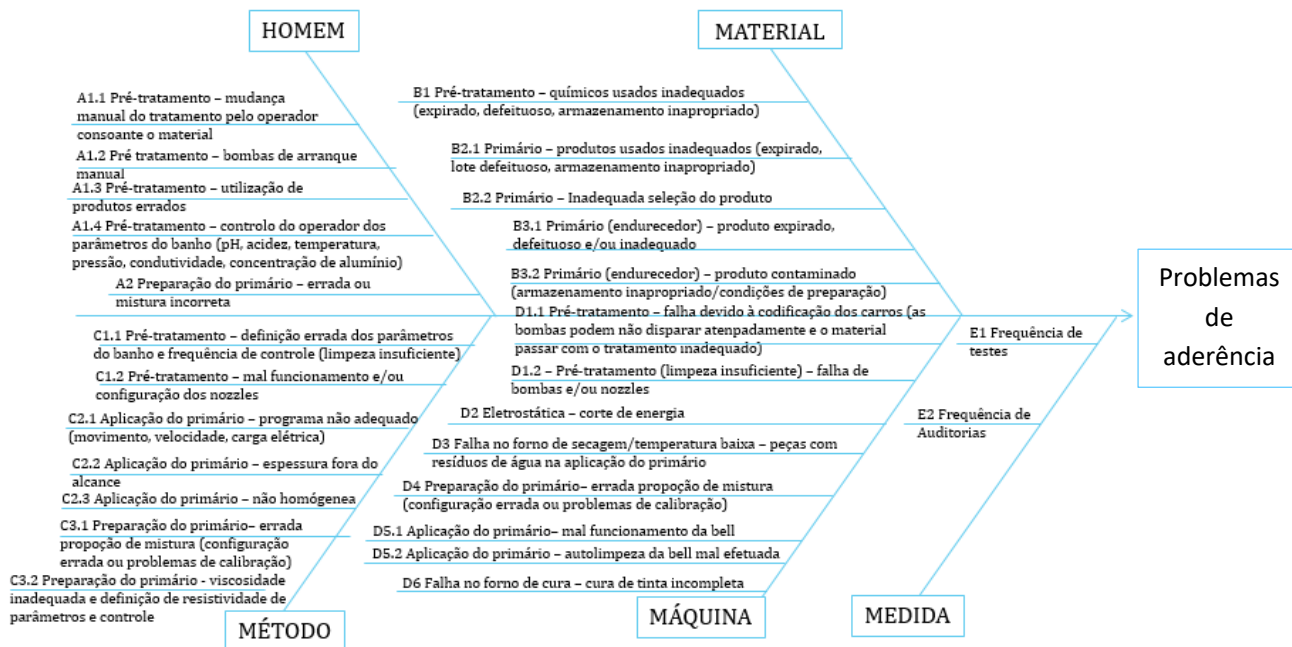


Figura 4.3 - Diagrama de Ishikawa

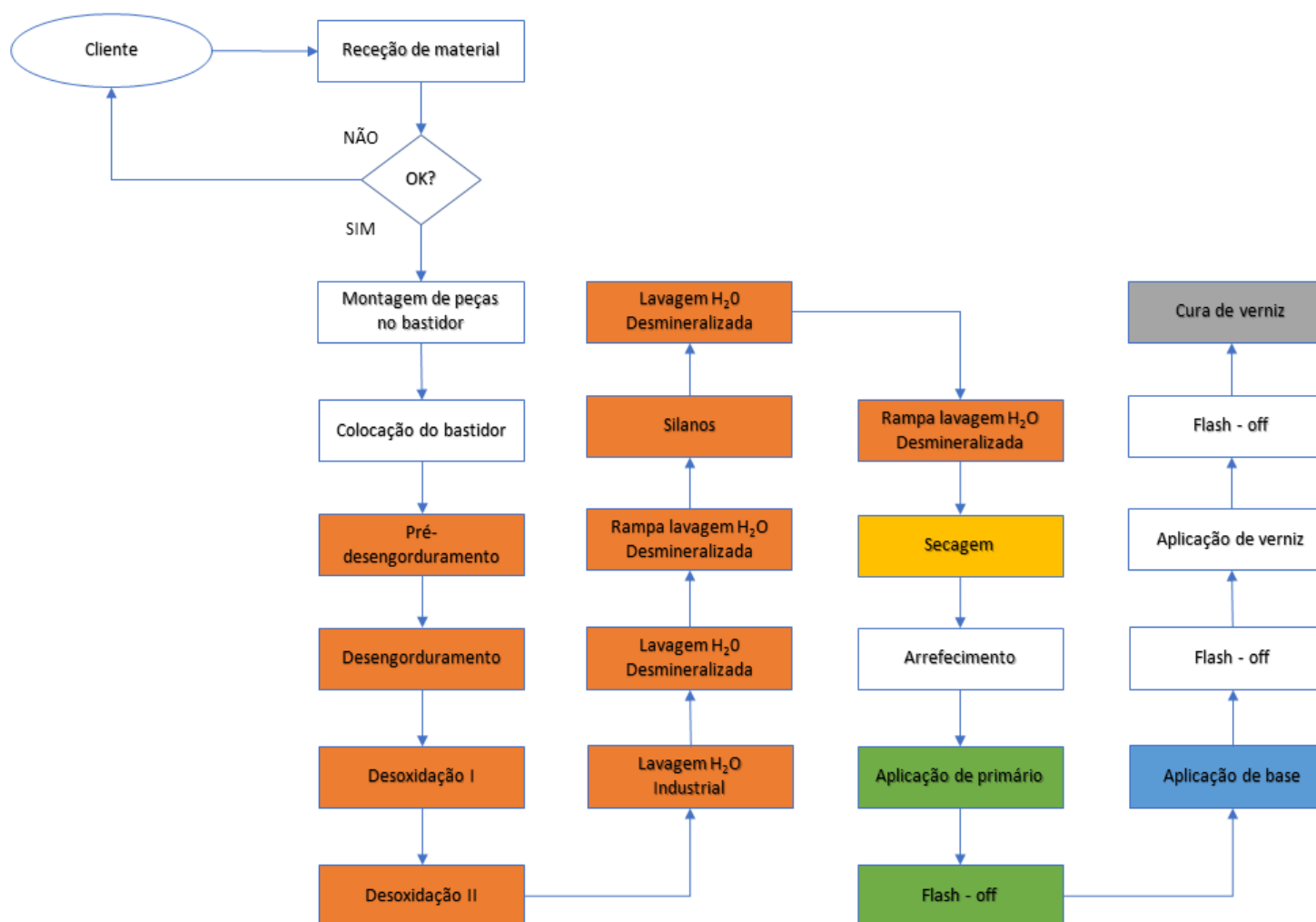


Figura 4.4 - Fluxograma do processo do projeto em estudo

Tabela 4.2 - Valores de frequência dos espectros obtidos nas amostras. Bandas coincidentes entre os dois espectros.

Valores de frequência obtidos nas amostras, número de onda (cm ⁻¹)	
Amostra de Tinta	Amostra de Óleo
3003	3003
2924	2924
2853	2853
1742	1742
1692	--
1528	1545
1468	1468
1462	1462
1377	1377
1238	1240
1162	1159
--	1119
1088	1090
1057	1059
1024	1018
994	993
--	908
766	--

Após a análise do espectro de Infravermelhos obtido e da indicação das bandas coincidentes podemos verificar a presença de óleo mesmo após o pré-tratamento das peças.

Medida implementada: Aumento da temperatura do túnel de pré-tratamento nos dois estágios de desengorduramento. Temperatura de trabalho: 40 a 45°C. Temperatura atual de trabalho: 50 a 55°C

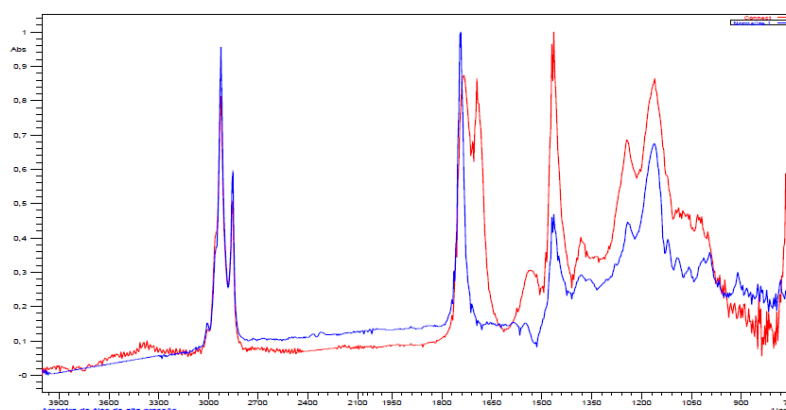


Figura 4.5 - Sobreposição dos espectros de IR obtidos nas amostras: "amostra de tinta" (espectro vermelho) e "amostra de óleo" (espectro azul)

Além disso, também se tentou solucionar alguns dos pontos menos fortes do processo referenciados no diagrama de Ishikawa. Deste modo, a equipa pluridisciplinar construiu a tabela de 5W2H para esquematizar os pontos em que era necessário atuar e qual a melhor maneira de o fazer.

5W2H						
What?	Why?	Who?	Where?	When?	How?	How Much?
Falta de aderência do revestimento	Pré-tratamento	Patrícia Abrantes, Laboratório, Chemetall e Manutenção	Linha 8	Ação já implementada	Formação exaustiva ao operador de banhos	Sem custo associado
				Ação já implementada (formação dada em Agosto de 2017)	Maior acompanhamento por parte do fornecedor	Sem custo associado
				Ação já implementada	Automação do túnel do pré-tratamento	Não definido
				Ação já implementada (desde Julho de 2017 são realizadas 2 por semana)	Realização de perdas de massas	Custo provetes de alumínio
				Ação já implementada	Aumento da temperatura das etapas de desengorduramento	Não definido
				Ação já implementada	Controlo das soluções de apoio à linha e prazos de validade (criação de inventário por parte do laboratório)	Sem custo associado
	Cabine de pintura	Patrícia Abrantes, Pintores, Fornecedores de tintas, Engenheiro de Processo, Programador e Qualidade	Linha 8	Ação já implementada	Separação bem definida e identificação dos produtos a aplicar	Sem custo associado
				Ação já implementada	Aconselhamento/acompanhamento do fornecedor na seleção dos produtos adequados a cada substrato	Não definido
				Sem prazo definido (em constante desenvolvimento)	Programa de pintura adequado	Não definido
				Ação já implementada no final de linha	Controlo das espessuras por camada	Não definido (calibração da lâmina de corte)
	Forno de Cura	Patrícia Abrantes, Laboratório, Manutenção	Linha 8	Ação já implementada (frequência da sua realização deveria ser mais apertada)	Realização de curvas de temperatura	Não definido (calibração do registador e sondas de temperatura)

4.1 Ensaios segundo a norma regente

Como referido anteriormente, apesar de terem sido realizados bastantes testes de despiste, apenas 5 foram caracterizados com ensaios de acordo com a norma regente GMW 14669 de 2016.

A norma referencia ainda que os testes devem ser realizados em triplicado.

Espessura

O primeiro ensaio a ser efetuado consiste na determinação da espessura total do revestimento de acordo com ISO 2808. Tendo em conta as fichas técnicas disponibilizadas pelos fornecedores a espessura total registada deverá estar compreendida num intervalo entre os 67 e 83 μm . Os valores registados apresentam um erro associado de 0,325 μm e encontram-se apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados das espessuras médias do revestimento




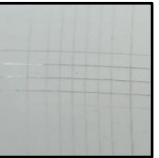








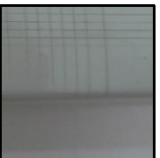


Teste/descrição	Data de produção	Espessura Total do revestimento (µm)
A – Produção normal	06/04/2017	73,7
		83,4
		74,8
B – Peças limpas com álcool		80,5
		81,1
		74,1
C – Pré-tratamento L1+Pintura L8		81,7
		77,7
		84,6
D - Pré-Tratamento L8 + 30 min imersão silanos		77,9
		83,9
		69,5
E – Peças sem pré-tratamento		70,1
		69,9
		75,4

Aderência

Efetuiu-se o ensaio de aderência segundo a norma GMW 14829 e efetuou-se a sua avaliação de acordo com a Tabela 2.9.

Os resultados obtidos encontram-se representados na Tabela 4.4. A realização deste ensaio tem como objetivo verificar a resistência do revestimento após a sua produção, cumprindo com as 72h de cura à temperatura ambiente. Neste ensaio apesar das diferenças na realização dos testes, ainda verificamos uma grande homogeneidade nos resultados, destacando apenas a peças 2 do teste E (peças sem pré-tratamento) que apresenta destacamento ao substrato.

Tabela 4.4 - Resultados da aderência pelo método da quadrícula




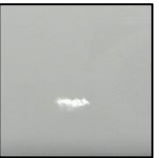

Resultados					
Ensaio de Aderência	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Peça 1					
Classificação	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)
Peça 2					
Classificação	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	1 (NOK)
Peça 3					
Classificação	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)

Ensaio de adequação da cura

O terceiro ensaio realizado foi o de adequação da cura segundo a GMW 15891. Os resultados obtidos podem ser consultados na Tabela 4.5 e a sua classificação foi efetuada recorrendo à Tabela 2.10. Como é notório este ensaio não faz uma avaliação às propriedades de adesão do revestimento, no entanto, com o intuito de se despistar problemas na cura existente no forno de convecção foram realizados ensaios que pusessem à prova a qualidade do verniz após cura.

Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de adequação da cura

Resultados					
Adequação da cura	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Peça 1					
Classificação	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)
Peça 2					
Classificação	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)



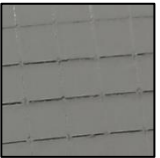





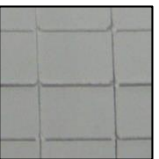

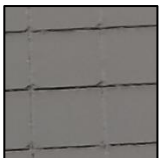

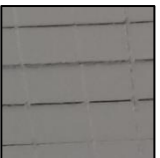
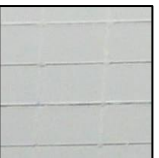
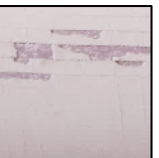
Peça 3					
Classificação	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)

Tendo em consideração os resultados apresentados verifica-se uma boa selagem no verniz.

Ensaio de humidade e condensação constante

Após 120h de humidade de acordo com a norma GMW 14729 é requerido um ensaio de aderência. Os resultados encontram-se ilustrados na Tabela 4.6. Na avaliação deste ensaio verifica-se uma heterogeneidade nos resultados em prole dos testes realizados.

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de aderência após 120h de humidade

Resultados					
Humidade 120h	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Peça 1					
Classificação	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	5 (NOK)
Peça 2					
Classificação	1 (NOK)	0 (OK)	0 (OK)	1 (NOK)	2 (NOK)
Peça 3					
Classificação	1 (NOK)	0 (OK)	0 (OK)	0 (OK)	4 (NOK)




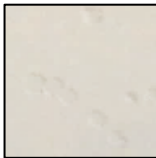
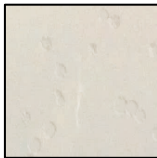
No teste A (peças de produção normal) verifica-se duas peças não conformes de acordo com a restrição da norma, este destacamento é indicativo da ineficiência da limpeza existente no pré-tratamento.

Já no teste D (peças com pré-tratamento na linha 8 + imersão durante 30 min nos silanos) é apresentada uma peça fora de especificação, apesar de ser verificada uma ligeira melhoria as peças continuam a ter um pobre pré-tratamento uma vez que os destacamentos apesar de ligeiros são diretamente ao substrato, o que vai de acordo, em dimensões diferentes, com os resultados do teste E (peças sem pré-tratamento).

As peças sem pré-tratamento apresentam destacamento em proporções maiores.

Após 240h as peças são sujeitas a nova avaliação, no entanto o ensaio de aderência já não é requisito. Na Tabela 4.7 pode-se verificar os resultados obtidos neste ensaio que têm como objetivo a avaliação de alterações na superfície do revestimento.

Tabela 4.7 – Resultados do ensaio de humidade após 240h





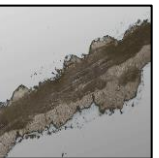
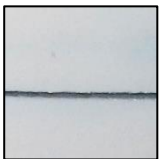
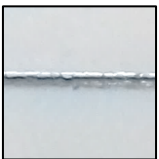

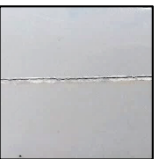
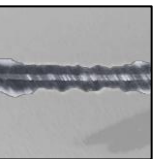
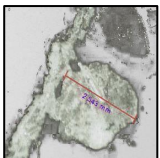




Resultados					
Humidade 240h	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Peça 1					
Classificação	S/ alterações (OK)	S/ alterações (OK)	S/ alterações (OK)	S/ alterações (OK)	Empolamentos (NOK)
Peça 2					
Classificação	S/ alterações (OK)	S/ alterações (OK)	S/ alterações (OK)	S/ alterações (OK)	Empolamentos (NOK)
Peça 3					
Classificação	Empolamentos (NOK)	Empolamentos (NOK)	S/ alterações (OK)	S/ alterações (OK)	Empolamentos (NOK)

Verifica-se a presença de empolamentos em algumas das peças testadas, o que poderá estar relacionado com o pré-tratamento, mas também com a evaporação dos solventes. Caso estes não tenham sido totalmente evaporados antes da cura do verniz podem ter tendência a quer “fugir” mais tarde.

Ensaio de Nevoeiro Salino

A realização do ensaio de nevoeiro salino tem como objetivo verificar se é formada corrosão em volta do corte realizado, este destrói a camada de pintura e permite o contacto direto entre o substrato e as condições do ensaio. Neste teste avalia-se o comportamento do revestimento à atmosfera marítima que pode ser analisado tendo em consideração a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de nevoeiro salino

Resultados					
Nevoeiro Salino	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Peça 1					
Classificação	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Corrosão (NOK)
Peça 2					
Classificação	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Corrosão (NOK)
Peça 3					
Classificação	Sem Corrosão C/ empolamentos (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Corrosão (NOK)

A película formada no estágio dos silanos é conhecida pelas propriedades anticorrosivas que fornece ao substrato, neste aspeto seria de esperar que o teste E (peças sem pré-tratamento) apresentasse corrosão, tal como se pode verificar na Tabela 4.8 que sintetiza os resultados para os ensaios de todos os testes.

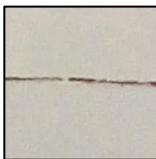





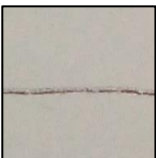



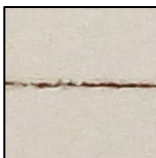


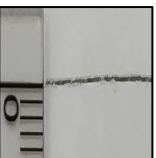
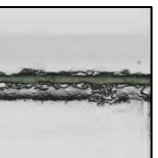
No caso da peça 3 do teste A (peças de produção normal) verifica-se a ausência de corrosão, no entanto é notória a presença de um empolamento que ronda os 3µm, esta medida foi obtida através da utilização do microscópio ótico presente no laboratório da CC. Este facto poderá relacionar-se com a ineficiência na remoção das gotas de óleo existentes nas peças.

Corrosão filiforme

A realização do ensaio de corrosão filiforme vai de encontro ao objetivo do ensaio de nevoeiro salino, sendo mais agressivo uma vez que é utilizada uma solução ácida. É de igual modo realizado um corte realizado, este destrói a camada de pintura e permite o contacto direto entre o substrato e as condições que o ensaio sugere.

Como referido anteriormente a película de silanos formada é conhecida pelas suas propriedades anticorrosivas, tendo em conta este ponto seria de esperar que o teste E (peças sem pré-tratamento) apresentasse corrosão, tal como se pode verificar na Tabela 4.9 que sintetiza os resultados para os ensaios de todos os testes.

Tabela 4.9 - Resultados do ensaio de corrosão filiforme

Resultados					
Corrosão Filiforme	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Peça 1					
Classificação	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Corrosão (NOK)
Peça 2					
Classificação	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Corrosão (NOK)
Peça 3					
Classificação	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Sem Corrosão (OK)	Corrosão (NOK)



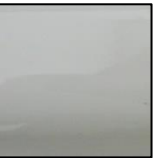

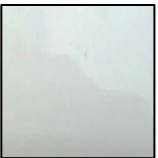


Nos restantes testes pode-se verificar a ausência de corrosão, o que indica que destes casos foi efetuado um bom desengorduramento das peças e uma uniformidade quer na desoxidação, quer na deposição da camada dos silanos.

Ensaio de resistência ao risco

Tal como o ensaio de adequação da cura, este não faz uma avaliação às propriedades de adesão do revestimento, como é visível na apresentação dos resultados na Tabela 4.10, no entanto, o comumente denominado *Scratch Resistance* é um ensaio que completa o nevoeiro salino. Pelo que faz todo o sentido proceder à sua realização.

Tabela 4.10 - Resultados do ensaio de resistência ao risco

Resultados					
Resistência ao risco	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Peça 1					
Classificação	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)

Peça 2					
Classificação	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)
Peça 3					
Classificação	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)	S /alterações (OK)




Pela análise dos resultados apresentados na verifica-se que o verniz efetuou uma boa cura, podendo mais uma vez colocar de lado a hipótese de ser uma causa da falta de aderência do revestimento.

Ensaio de resistência aos químicos

Apesar de se ter ensaiado cinco químicos diferentes como já referido anteriormente (óleo de motor, óleo de travões, anticongelante, limpa vidros e glicol), não foram verificadas alterações pelo que apenas é apresentada uma tabela única que resume o teste no geral - Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Resultados do ensaio de resistência aos químicos

Resultados					
Resistência aos químicos	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
Peça 1					
Classificação	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)
Peça 2					
Classificação	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)

Peça 3					
Classificação	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)	Rating 10 (OK)

Neste ensaio verifica-se de forma semelhante ao ensaio de adequação de cura que o esquema de pré-tratamento utilizado não tem qualquer influência na capacidade de resistência do verniz às agressões provocadas.

4.2 Ensaios complementares

Para além dos ensaios anteriormente caracterizados de acordo com a norma regente, realizaram-se mais testes de despiste. A descrição dos ensaios pode ser consultada na Tabela 3.1.

Nestes ensaios apenas foi realizado o ensaio de aderência normal, como se pode verificar na Tabela 4.12. O conceito aderência normal implica a realização do ensaio após as 72h de cura à temperatura ambiente. O curto período destinado à dissertação, bem como a elevada quantidade de testes realizados não permitiu a sua caracterização na totalidade.

Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de aderência dos restantes ensaios

Aderência			
Teste	Peça 1	Peça 2	Peça 3
F	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
G	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 1 (NOK)
H	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
I	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
J	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
K	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
L	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
M1	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
M2	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
N1	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
N2	Rating 3 (NOK)	Rating 4 (NOK)	Rating 3 (NOK)
N3	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)	Rating 0 (OK)
N4	Rating 3 (NOK)	Rating 4 (NOK)	Rating 3 (NOK)
O1	Rating 1 (NOK)	Rating 1 (NOK)	Rating 1 (NOK)
O2	Rating 2 (NOK)	Rating 2 (NOK)	Rating 2 (NOK)
O3	Rating 1 (NOK)	Rating 1 (NOK)	Rating 1 (NOK)
O4	Rating 2 (NOK)	Rating 2 (NOK)	Rating 3 (NOK)

Pela análise dos resultados verifica-se que os testes que não passaram pelo pré-tratamento (N2, N4, O2 e O4) apresentam em todas as peças testadas destacamento até ao substrato. Este resultado poderia sobrepor-se ao presente na Tabela 4.4, onde não se verifica falhas tão acentuadas.

No entanto, é de salientar que o processo de pintura foi alterado (aplicação ou só de primário ou só de endurecedor), influenciando o esquema de pintura e adicionando mais uma variável à análise.

Analisando também a comparação entre os testes N1 Vs O1 verifica-se que as peças impregnadas em óleo antes de passarem pelo pré-tratamento têm comportamentos diferentes. As peças que levaram na cabine do primário apenas endurecedor possuem propriedades de resistência ao ensaio da quadrícula superiores. Este facto deve-se à constituição do endurecedor ser enriquecida com resina, enquanto que o primário possui tantos outros constituintes que podem alterar o seu poder de aderência. Pode-se dar ênfase ainda a esta propriedade com a comparação do Teste F e G.

Com o auxílio dos resultados obtidos, despistamos também problemas que pudessem existir no forno de convecção (influencia na cura e consequente falha de aderência), falta de evaporação dos solventes e consequente mistura com as camadas aplicadas posteriores.

Caso exista um erro do operador e seja misturado diluente de limpeza na base ou primário em vez de ser utilizado o solvente adequado, verifica-se que no ensaio de controlo o problema não é detetado, podendo-se também eliminar esta causa.

Foi também verificada a tensão superficial do primário aplicado bem como a determinação dos ângulos de contato. Os resultados estão sintetizados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados obtidos nas medições de tensões superficiais e ângulos de contacto

Líquido	$\Theta(^{\circ})$	Tensão superficial das soluções (γ_{LV})	
		Huh-Mason Correction (dyn/cm)	Zuidema Waters correction (dyn/cm)
Água destilada		71,64	71,20
Glicerol		51,40	51,30
Dietileno glicol		43,83	43,77
Etileno glicol		46,88	46,77
Primário A	28,09	27,41	27,72
Primário B	28,33	25,65	26,01

4.3 Perda de Massa e curva de temperatura

No dia da realização dos ensaios caracterizados mais aprofundadamente (06-04-2017) foi efetuada uma perda de massa no túnel de pré-tratamento e um registo de temperatura no forno de cura do verniz.

Na Tabela 4.14 podemos verificar os parâmetros dos banhos na altura da passagem dos provetes pelo túnel. Os provetes foram limpos com solvente de acordo com o indicado na IMCM, deste modo não se consegue verificar se a presença de óleo afeta este ponto de análise. A perda de massa, também denominada por taxa de corrosão, alcançada com um provete de 0,020 m² é de 3,813 g/m². De acordo com o referido pelo fornecedor na IMCM os valores adequados para a perda de massa são $\geq 2,5$ g/m², tendo em conta esta especificação o túnel de pré-tratamento está a cumprir com o ataque químico esperado.

Posteriormente, foi realizada uma perda de massa utilizando provetes limpos com solvente e outros não limpos, com o intuito de simular a presença de óleo que ocorre nas peças. Os resultados obtidos apresentavam uma diferença percentual de 81,6, verificando-se uma perda de massa

superior nos provetes limpos com álcool. É ainda de salientar a diferença entre a liga dos provetes e a presente nas peças.

O registo de temperatura efetuado ao forno de cura é visível na Figura 4.6. Aquando a entrada do registador em linha são registados os parâmetros como a velocidade da linha, a temperatura real e a programada para o forno.

Temperatura programada = 86,5°C

Temperatura real = 86,9°C

Velocidade da linha = 1,05 m/min

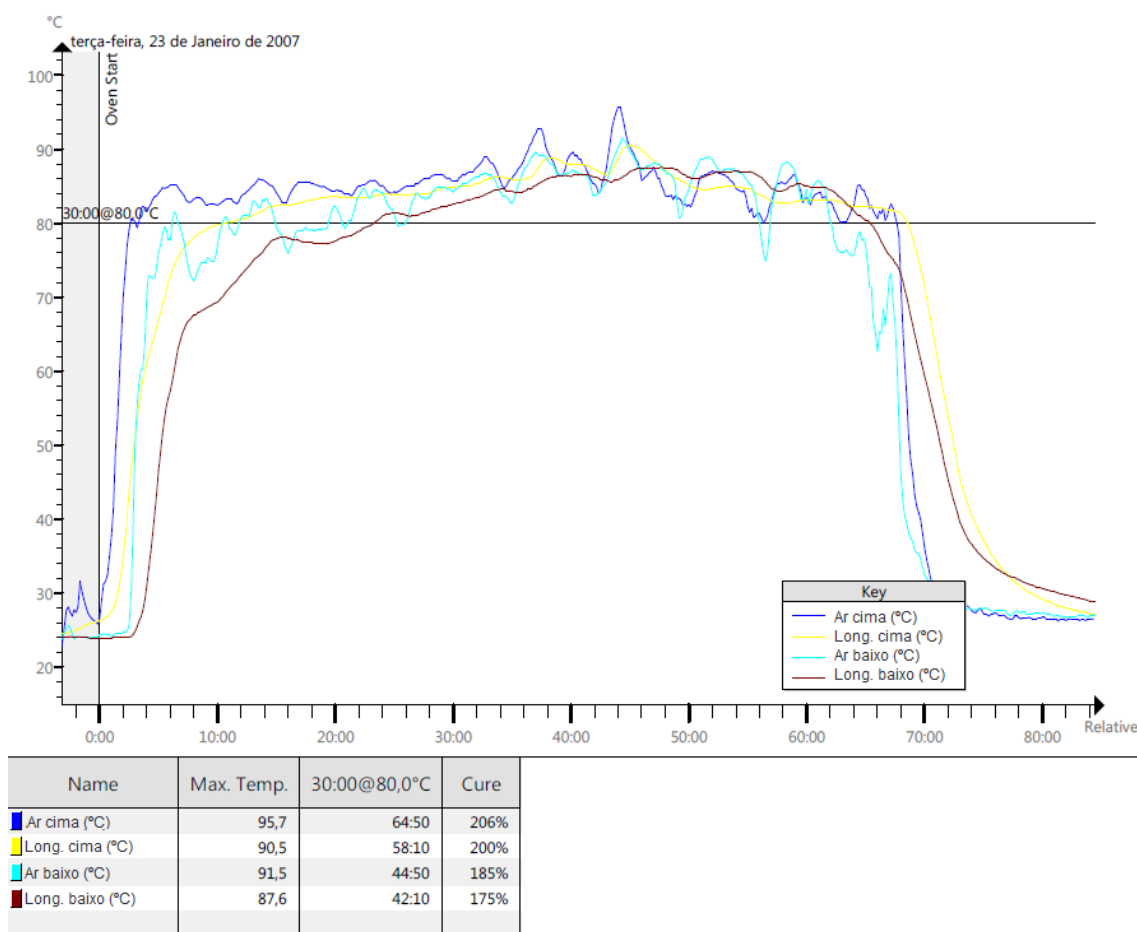


Figura 4.6 - Curva de Temperatura

Após análise do registo efetuado é notória a presença de cura nas peças testadas o que vem de encontro com o já referenciado anteriormente, pelo que o problema de aderência não está interligado com esta causa.

Estudo de Causas Raiz na Falha de Aderência em Revestimentos Aplicados em Ligas de Alumínio

Tabela 4.14 - Resultado obtidos na perda de massa

Provete (posição JIG)	Estágio	m inicial (g)	m final (g)	Δm (g)	Taxa Corrosão (g/m ²)	Taxa Corrosão média (g/m ²)	% perda massa (g)	Acidez livre (aquando da passagem dos provetes nos	T (°C)
A (em cima)	Pré-Desengorduramento com o produto Gardoclean 5244				0,0000	0,000	-	6,5	44,6
B (no centro)					0,0000		-		
C (em baixo)					0,0000		-		
D (em cima)	Desengorduramento Gardoclean 5244				0,0000	0,000	-	6,5	44,5
E (no centro)					0,0000		-		
F (em baixo)					0,0000		-		
G (em cima)	Desoxidação 1 (1º banho de água industrial) Gardoclean 5244				0,0000	0,000	-	7,5	
H (no centro)					0,0000		-		
I (em baixo)					0,0000		-		
J (em cima)	Desoxidação 2 (banho da desoxidação) Gardoclean 5244				0,0000	0,000	-	7,5	
K (no centro)					0,0000		-		
L (em baixo)					0,0000		-		
M (em cima)	Todos os estágios (com silano)	21,0384	20,9708	0,0676	3,3767	3,813	0,3213	São considerados os valores individuais de cada estágio, pois os provetes passaram todos de seguida	
N (no centro)		21,0509	20,9745	0,0764	3,8163		0,3629		
O (em baixo)		21,0284	20,9434	0,0850	4,2459		0,4042		

Capítulo 5 - Conclusões

Com a realização desta dissertação foi possível caracterizar um dos revestimentos mais utilizados na linha de pintura líquida da *Caetano Coatings* e utilizar ferramentas de gestão da qualidade, com o auxílio de uma resolução estruturada de problemas recorrendo à metodologia *Shainin*.

Através desta metodologia e com o auxílio de uma equipa pluridisciplinar foi possível encontrar as principais variáveis e potenciais causas raiz. Estas foram classificadas pela equipa, recorrendo aos diagramas de *Pareto* e *Ishikawa*, por ordem de relevância e os testes de despiste realizados de acordo com as prioridades definidas. As principais causas identificadas foram a influência do óleo nas peças, a insuficiência do pré-tratamento e o desempenho do primário. Foi ainda completada uma tabela de *5W2H* com ações de melhoria e respetivos períodos de implementação.

A tensão superficial do substrato metálico não foi avaliada devido às elevadas rugosidades já existentes no material, bem como as que ainda vão ser criadas durante as desoxidações.

Com a análise do FTIR presente na Figura 4.5 pode-se verificar um grande número de bandas coincidentes, deste modo é notória a presença de óleo na camada do destacamento, sendo este o causador do mesmo. Verifica-se uma banda com um comprimento de onda de aproximadamente 1680 cm^{-1} , que segundo a literatura corresponde a uma ligação característica de um uretano, o que indica a presença de resina PUR no primário^[47]. Através da análise da Tabela 4.2 verifica-se também que para um comprimento de 1692 cm^{-1} não existe correspondência por parte da amostra de óleo.

A realização dos ensaios de acordo com a norma da OEM permitiu concluir a importância do pré-tratamento nos ensaios de resistência à corrosão. Apesar de aparentemente não afetar o revestimento na realização dos ensaios rápidos (aderência, adequação de cura e resistência aos químicos) com a exposição a agentes mais agressivos como é o caso da solução de cloreto de sódio, de cloreto de sódio cupro acético e de um ambiente de elevada temperatura e humidade existem falhas que podem ocorrer, sejam estas de falta de aderência, empolamentos e/ou corrosão.

É possível concluir que o desgorduramento alcalino (pré-tratamento linha 1) apresenta um melhor comportamento na caracterização segundo a norma comparativamente ao desgorduramento ácido (pré-tratamento linha 8). Deste modo, poderia surgir a questão porque não uma mudança no pré-tratamento? No entanto, o alumínio necessita da ausência de etapas alcalinas por forma a evitar secagens que promovem a oxidação no alumínio (normalmente de coloração acastanhada). Os óxidos de alumínio são de difícil remoção pelo que necessitam de produtos de base fluorídrica, de natureza ácida, para que não seja condicionada a uniformidade da camada de conversão^[48].

No entanto, como referido anteriormente a presença de óleo é um potenciador do problema de aderência, inibindo também a boa eficiência dos estágios do pré-tratamento. Deste modo, e devido à capacidade de adaptação do produto utilizado nos estágios ácidos foi possível o aumento da temperatura de trabalho do túnel de pré-tratamento dos 45°C para os 55°C (Manual do fornecedor). Uma vez que as etapas de desgorduramento são realizadas a quente, o aumento da temperatura poderá ajudar na eficiência da remoção do óleo e/ou outros contaminantes^[48].

Implementou-se também a limpeza com álcool de vários projetos de alumínio antes da entrada no túnel de pré-tratamento de modo a assegurar a eficiência do processo, uma vez que também se verificou um bom desempenho das peças na realização dos ensaios normativos.

Foi possível também verificar a diferença de comportamento aquando a aplicação só de primário (sem endurecedor) e de endurecedor (sem primário). Este facto poderá estar relacionado com as propriedades elásticas do endurecedor comparativamente ao primário. No entanto, esta observação deveria ser melhor analisada.

Pode-se concluir que a nossa causa raiz passa pela presença de óleos nas peças juntamente com a baixa eficiência do pré-tratamento. Este facto, é ainda reforçado com os valores obtidos nas perdas de massa realizadas a provetes limpos com solventes e sem a devida limpeza. Verifica-se uma diminuição de 81,6% na perda de massa quando estes não são limpos, o que pode significar que a peça não é “atacada” o suficiente. Ou seja, ao se perder pouca massa são criadas poucas rugosidades o que influencia a uniformização da camada de silanos bem como promover a aderência ao substrato^[48].

Além de se despistar o falhanço que poderia ter ocorrido na escolha das etapas de pré-tratamento, foi possível também verificar as excelentes condições do forno de convecção utilizado para a realização da cura do revestimento. Através da análise do registo de temperatura é possível verificar que as peças à saída de linha apresentam cura no seu revestimento, estando este bem selado.

5.1 Desenvolvimento de trabalho futuro

Futuramente podem ser realizados novos projetos que explorem a influência do endurecedor no primário e/ou só a aplicação, compreendendo a sua estrutura química e propondo soluções ou até mesmo o desenvolvimento de novos primários com diferentes propriedades.

Seria interessante também verificar a influência do aumento da temperatura no pré-tratamento, comparando deste modo a ocorrência de falhas existentes desta altura com a atual.

Referências Bibliográficas

- [1] Mooren, J. *Background on Shanin based problem solving*. <https://www.innovation.services.philips.com/app/uploads/2017/01/shainin-techniques-jo-mooren.pdf> (accessed Sep. 11, 2017).
- [2] Schmidt, M. *General Motors Technical Problem Solving Group Drives Excellence*. general-motors.pdf.<http://asq.org/public/wqm/general-motors.pdf> (accessed Sep. 20, 2017).
- [3] Goldschmidt, A. and Streitberger, H.-J. *BASF handbook on basics of coating technology*. Vincentz Network: Hannover 2007. 16-100
- [4] AFIA confiante no crescimento da Indústria de Componentes para automóveis. <http://automonitor.pt/2016/09/06/comercio-e-industria/afia-confiante-no-crescimento-da-industria-de-componentes-para-automoveis/> (accessed Sep. 23, 2017).
- [5] Castro A.; Costa A.; Neves Â.; Melo J.; Ferreira S.; Lopes V., *Materiais utilizados na concepção de um automóvel - Materiais metálicos e respetivos componentes*. (2010). 5-10
- [6] Marques, F. P. F. M. *Tecnologias de Aplicação de Pinturas e Patologias Em Paredes de Alvenaria e Elementos de Betão*, 2013.6-8
- [7] Bayer G.T; Zamanzedeh, M. *Failure Analysis of Paints and Coatings*. (2004). 8-37
- [8] Schweitzer, P. A. *Paint and Coating - Applications and Corrosion Resistance*. CRC Press: Estados Unidos da América 2006.
- [9] Silva, P. A. O. e *Estudo e Caracterização de Revestimentos Aplicados Em Peças Da Indústria Automóvel*, 03/2017.
- [10] Kosina, J. *Shainin Methodology: An Alternative or an Effective*. *QUALITY INNOVATION PROSPERITY*. , 18–31. (2015).
- [11] Shainin, The RedX Company; *Shainin and Six Sigma*. <https://shainin.com/uploads/Shainin%20Articles%20of%20interest%20%20PDF/Shainin%20vs%20Six%20Sigma.pdf> (accessed Sep. 11, 2017).
- [12] Azevedo, A. *Ferramentas de Apoio à Gestão*. IBEROGESTÃO: Vila Nova de Gaia 2014. 20-60
- [13] *Desafios da logística após a crise - "5W2H."* <https://www.linkedin.com/pulse/desafios-da-log%C3%ADstica-ap%C3%B3s-crise-5w2h-atlan-barbosa>
- [14] César, F. I. G. *Ferramentas Básicas da Qualidade*. biblioteca24horas: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22C%C3%89SAR,%20F.%20I.%20G.%22> (accessed May. 11, 2017).

- [15] Filleti, E.A. *As novas aplicações para o alumínio na indústria automotiva*. (2010). <http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/automotiva/downloadsAutomot/b8AFilletiAluminio.pdf> (accessed Jul. 10, 2017).
- [16] *Tabela Periódica Dinâmica*. [//www.ptable.com/?lang=pt](http://www.ptable.com/?lang=pt) (accessed May. 20, 2017)
- [17] Automotive Aluminum in Cars and Trucks | *The Aluminum Association*. <http://www.aluminum.org/product-markets/automotive> (accessed Aug. 8, 2017).
- [18] Team, T. *Trends In Steel Usage In The Automotive Industry*. (2015). <https://www.forbes.com/sites/greatspeculations/2015/05/20/trends-in-steel-usage-in-the-automotive-industry/#49c47cf91476> (accessed May. 25, 2017)
- [19] *Aluminco S.A. Aluminium alloy EN-AW 6060 (AlMgSi0,5)*. http://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf (accessed Mar. 23, 2017)
- [20] Serra, C. *Estudo de Silanos Nas Linhas de Pintura Da Caetano Coatings*, 2011. 10-35
- [21] AEP- *Associação Empresarial de Portugal Manual de Produção + Limpa do Sector do Tratamento de Superfícies*. (2011). http://www.pofc.qren.pt/ResourcesUser/2013/Publicacoes/BanchMark_AE_ManualProducaoMai_Limpa_TratamentoSuperficies1.pdf (accessed Abr. 20, 2017)
- [22] O que são surfactantes? Conheça composição, usos, impactos e alternativas. <http://www.ecycle.com.br/component/content/article/63-meio-ambiente/2352-o-que-saofactantes-conheca-composicao-usos-impactos-e-alternativas.html> (accessed Aug. 8, 2017).
- [23] *Automotive paints and coatings*. Wiley-VCH-Verl: Weinheim 2008.80-120
- [24] Chemetall Group - Oxsilan® – *The eco-friendly silan-based pretreatment technology*. <http://www.chemetall.com/Products/Trademarks/Oxsilan/index.jsp> (accessed Aug. 9, 2017).
- [25] Chemetall Oxsilan® thin-film technology: *The next generation in metal protection*. (2016). <http://www.chemetall.com/Products/Product-Groups/Conversion-Coatings/index.jsp> (accessed Aug. 9, 2017)
- [29] Goldschmidt & Streitberger *BASF Handbook - Basics of coating technology*. Germany 2003.50-85
- [30] Barradas Vicente, P. L. *Desenvolvimento e Caracterização de Um Primário Anticorrosivo Para Metais*, 10/2014. 25-45
- [31] JANSEN, J. U. *SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE VERNIZ ELETROISOLANTE PARA CURA DUAL UV/TÉRMICA*, 2005.
- [32] Ferreira de Carvalho, J. P. *Definição de Condições de Pintura de Peças Para Autorrádio*, 10/2013. https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/30370/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Jo%C3%A3o%20Carvalho_2013.pdf (accessed Fev. 8, 2017)

- [33] *Projeto Física e Cidadania*.
- [34] Prime Products, Inc. *Guide to Maximizing Spray Paint Adhesion*. <http://www.primeproductsinc.com/pdf/guide-to-maximizing-spray-paint-adhesion.pdf> (accessed Aug. 8, 2017)
- [35] Machado Monteiro, G. M. *Análise de Revestimentos Orgânicos Por Espectroscopia de Infravermelho*, 11/2007. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137461902/Tese%20Final%20de%20Mestrado.pdf> (accessed Mar. 12, 2017)
- [36] Que é Microscopia Óptica? [https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Optical-Microscopy-\(Portuguese\).aspx](https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Optical-Microscopy-(Portuguese).aspx) (accessed Sep. 24, 2017).
- [37] General Motors Topcoat, Generic Qualification. (2013).
- [38] International Organization for Standardization Paints and varnishes — Determination of film thickness. (2007).
- [39] GMW 14829 - General Motors Tape Adhesion Test for Paint Finishes. (2006).
- [40] GMW 15891 - General Motors Solvent Rub Method for Determining Cure of Painted Metal or Plastic Substrates. (2013).
- [41] GMW 14729 - General Motors Procedures for High Humidity Test. (2007).
- [42] General Motors Cyclic Corrosion Laboratory Test. (2013).
- [43] GMW 15287 - General Motors Filiform Corrosion Test Procedure for Painted Aluminum Wheels and Painted Aluminum Wheel Trim. (2013).
- [44] GMW 14698 - General Motors Scratch Resistance of Organic Coatings and Self-adhesive Foils. (2012).
- [45] GMW 14701 - General Motors Resistance of Coatings to Chemical Etching and Distortion. (2011).
- [46] *Instruções de montagem, controlo e manutenção de banhos de tratamento de superfícies metálicas*. (2017). Manual do fornecedor
- [47] Defeyt, C. , Langenbacher, J. , and Rivenc, R. *Polyurethane coatings used in twentieth century outdoor painted sculptures. Part I: comparative study of various systems by means of ATR-FTIR spectroscopy*. *Heritage Science* **2017**, 5, 11.
- [48] Cristovão, P. Tratamento Alumínio Linha L8 Processo de Tratamento. (2017). Apresentação do fornecedor

Anexos

Anexo A - Tabela comparativa de parâmetros e etapas de tratamento da Linha 1 e 8

Linha 1 – Apenas peças de metal (diferentes tipos)				Linha 8 – Alumínio e peças de plástico			
Estági o	Descrição	Parâmetros	Especificação	Estági o	Descrição	Parâmetros	Especificação
1	Pré-desengorduramen to	Alcalino (pts)	1,0 – 8,0	1	Pré-desengord uramento	Ácido livre (pts)	6,0 – 8,0 (6,5)
		Temperatura (°C)	45 - 55			Alumínio (g/L)	< 1,0
		Pressão (bar)	0,8 – 1,5			Temperatura (°C)	50 - 55
						Pressão (bar)	1,0 – 1,5
2	Desengorduramen to	Alcalino (pts)	9,0 – 11,0	2	Desengord uramento	Ácido livre (pts)	6,0 – 8,0 (6,5)
		Temperatura (°C)	45 - 55			Alumínio (g/L)	< 0,5
		Pressão (bar)	0,8 – 1,5			Temperatura (°C)	50 - 55
						Pressão (bar)	1,0 – 1,5
3	Água de lavagem	-	-	3	Água de lavagem	-	-
4	Desoxidação	Concentração (g/L)	12,0 – 25,0	4	Desoxidaçã o I	Ácido livre (pts)	6,0 – 8,0 (7,5)
		Pressão (bar)	0,8 – 1,5			Alumínio (g/L)	< 0,8
						Pressão (bar)	1,0 – 1,5
					Desoxidaçã o II	Ácido livre (pts)	6,0 – 8,0 (7,5)
						Alumínio (g/L)	< 0,8
						Pressão (bar)	1,0 – 1,5
5	Lavagem de água desmineralizada	Condutividade (µS/cm)	≤ 100	5	Lavagem de água desmineral ziada	Condutividad e (µS/cm)	≤ 100
		pH	5,0 – 7,0			pH	4,0 – 7,0
		Pressão (bar)	0,8 – 1,5			Pressão (bar)	1,0 – 1,5
				6	Rampa de água desmineral izada	Condutividad e (µS/cm)	< 30
						Pressão (bar)	1,0 – 1,5
6	Silanos	Atividade (pts)	5,0 – 9,0	7	Silanos	Flúor livre (ppm)	80 - 200
		Condutividade (µS/cm)	≤ 5000			Alumínio dissolvido (mg/L)	< 100
		pH	3,8 – 5,0			Pontos de atividade	
		Flúor	80 - 130				

Estudo de Causas Raiz na Falha de Aderência em Revestimentos Aplicados em Ligas de Alumínio

		Pressão (bar)	0,8 – 1,5			Condutividade e ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	≤ 3000
						pH	3,6 – 4,4
						Pressão (bar)	0,5 – 1,0
7	Lavagem de água desmineralizada	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	≤ 20	8	Lavagem de água desmineralizada	Condutividade e ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	≤ 30
		Pressão (bar)	0,8 – 1,5			Silício (mg/L)	$< 0,8$
						pH	4,0 – 7,0
						Pressão (bar)	0,5 – 1,0
8	Rampa de água desmineralizada	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	≤ 20	9	Rampa de água desmineralizada	Condutividade e ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	≤ 10
		Pressão (bar)	0,8 – 1,5			Silício (mg/L)	$< 0,5$
						Pressão (bar)	1,0 – 1,5